



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**ZJIŠŤOVÁNÍ MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ VZORKŮ
VYROBENÝCH KOVOVÝM 3D TISKEM**

DETERMINATION OF MATERIAL PROPERTIES OF SPECIMENS PRODUCED BY METALLIC 3D PRINTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Alexandr Zakl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Řiháček, Ph.D.

BRNO 2021

Tato strana je záměrně ponechána prázdná.

Zadaní bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Alexandr Zakl**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jan Řiháček, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Zjišťování materiálových vlastností vzorků vyrobených kovovým 3D tiskem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

3D tisk je v současnosti vysoce žádaná a aktuální problematika, řešená ve všech odvětvích průmyslu. Představuje jednu z možných efektivních náhrad konvenčních technologií výroby a nabízí rovněž i možnosti využití různých materiálů. Základním úkolem je tedy vypracovat literární rešerši zaměřenou na metody 3D tisku, zejména možnosti 3D tisku kovových materiálů s následnou analýzou využití 3D optických metod při vyhodnocování materiálových vlastností tisknutých vzorků.

Cíle bakalářské práce:

- vypracování aktuální literární rešerše se zaměřením na 3D tisk kovů a systémy 3D optického měření,
- rozbor vybraných metod 3D tisku,
- rozbor možností vyhodnocení materiálových vlastností se zaměřením na optické měření,
- návrh zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku,
- praktické měření.

Seznam doporučené literatury:

ASM INTERNATIONAL. ASM Handbook volume 6: Welding, Brazing and Soldering. Materials Park, Ohio: American Society for Metals, 1993. ISBN 978-0-87170-382-8.

DANIELSEN EVJEMO, Linn, Signe MOE, Jan Tommy GRAVDAHL, Olivier ROULET-DUBONNET, Lars Tore GELLEIN a Vegard BROTON. Additive manufacturing by robot manipulator: An overview of the state-of-the-art and proof-of-concept results. In: 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. IEEE, 2017. ISBN 978-1-5090-6505-9.

GIBSON, Ian, David ROSEN a Brent STUCKER. Additive Manufacturing Technologies. 2010. ISBN 978-1-4419-1119-3.

KRATOCHVÍLOVÁ, Jitka. 3D tisk. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2015. ISBN 978-80-7414-936-8.

MESSLER, Robert Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy. New York, USA: John Wiley & Sons, 1999, 662 s. ISBN 04-712-5376-6.

MANOJ, Gupta. 3D Printing of Metals. MDPI AG - Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2017. ISBN 9783038425915.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

ZAKL, Alexandr: Zjišťování materiálových vlastností vzorků vyrobených kovovým 3D tiskem

Práce pojednává o mechanických vlastnostech a stavu 3D tisknutých kovových součástí, tisknutých zejména metodou DMLS/SLM. Rešeršní část je věnována různým technologiím a dodavatelům v oblasti 3D tisku s důrazem na metody tisknutí kovu. Záměrem této práce je spojit světy 3D tisku a 3D optického měření deformací, proto je část rešerše věnována těmto měřidlům a přední inovativní firmě v této oblasti GOM. Jeden z předních produktů této firmy ARAMIS byl použit pro vyhodnocení zkoušky, která je popsána v experimentální části. Rešeršní část se věnuje metodě digitální korelace obrazů a úprav součástí k následnému optickému měření. Vzorky v experimentální části této práce byly vytisknuty na tiskárně od firmy XactMetal. Následně pak byly měřeny pomocí metody DIC při průběhu tahové zkoušky a na základě získaných dat byly stanoveny základní materiálové charakteristiky.

Klíčová slova: 3D tisk, Aditivní výroba, optické měřicí systémy, DMLS, SLM, tahová zkouška, GOM, ARAMIS, DIC

ABSTRACT

ZAKL, Alexandr: Determination of Material Properties of Specimens Produced by Metallic 3D Printing

This bachelor's thesis deals with mechanical properties and current status of 3D printing of metal parts, especially by DMLS/SLM method. Research part is dedicated to various technologies and suppliers in the field of 3D printing with emphasis on printing metal methods. Main purpose of this thesis is to connect the worlds of 3D printing and 3D optical measuring of deformation, so the part of research segment is dedicated to optical measuring and leading innovative company GOM. One of the leading product of this company is ARAMIS and in the context of this thesis it was present during the experiment as a instrument for measuring and inspecting material characteristics, and is present in research part where is mentioned a principle on which this device is working (digital image correlation) as is the device itself. In the experimental part of this thesis, samples were printed on DMLS printer from company XactMetal, which were then submitted to a tensile test. Measurement was done using DIC based device ARAMIS and inspected for basic material properties in same named program.

Keywords: 3D printing, additive manufacturing, Optical measuring systems, DMLS, SLM, Tensile test, GOM, ARAMIS, DIC

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZAKL, Alexandr. *Zjišťování materiálových vlastností vzorků vyrobených kovovým 3D tiskem* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-06]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132141>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jan Řiháček.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V dne

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval panu Ing. Janu Řiháčkovi, Ph.D. za trpělivost a cenné rady, které pomohly ke vzniku této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval celému kolektivu z MCAE Systems, zejména Ing. Matyáši Chaloupkovi a Ing. Marku Blažovi, za poskytnutí přístupu k potřebným zařízením a za zkušenosti, které mi předali. Obrovské díky patří také mé rodině a mým přátelům za stálou podporu a trpělivost.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	11
-------------------	-----------

1 Aditivní výroba a 3D tisk.....	12
-----------------------------------------	-----------

1.1 Metody 3D tisku	13
----------------------------------	-----------

1.1.1 Metody na bázi kapalin	13
------------------------------------	----

1.1.2 Metody na bázi pevných látek.....	15
-----------------------------------------	----

1.1.3 Metody na bázi práškových materiálů	17
-------------------------------------------------	----

1.2 Zkoušení tisknutých součástí	20
-----------------------------------------------	-----------

2 Optické měřicí systémy	21
---------------------------------------	-----------

2.1 Digitální korelace obrazů	21
--------------------------------------------	-----------

2.2 Příprava součástí pro optické měření	22
-------------------------------------------------------	-----------

2.2.1 Stochastický nástřik.....	22
---------------------------------	----

2.2.2 Referenční body kódované a nekódované.....	22
--------------------------------------------------	----

2.2.3 Měrné sítě.....	23
-----------------------	----

2.3 Zařízení pro kontrolu a měření	24
-------------------------------------------------	-----------

2.3.1 ARAMIS	24
--------------------	----

2.3.2 TRITOP.....	26
-------------------	----

2.3.3 ARGUS	27
-------------------	----

2.3.3 ATOS	27
------------------	----

3 Návrh a zkoušení vzorků pro kovový 3D tisk.....	29
3.1 Návrh vzorku	29
3.2 Použité zařízení a vzorky.....	30
3.2.1 Aramis SRX 12M.....	30
3.2.2 Tiskárna XactMetal XM200C.....	31
3.2.3 Zwick Roell BT-1.....	32
3.3 Průběh zkoušky	32
3.4 Vyhodnocení	34
3.4.1 Modul pružnosti (Youngův modul).....	34
3.4.2 Mez pevnosti v tahu	35
3.4.3 Kontrola meze pevnosti v tahu.....	35
4 Závěry.....	37

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam příloh

ÚVOD [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]

V současnosti je technologie 3D tisku zařazena mezi nové progresivní metody, jak dosáhnout rychlého a efektivního generování prototypů, či v některých případech i konečných součástí. Obecně se jedná o vrstvení materiálu odpovídající průřezu finální součásti a následné posunutí o výšku vrstvy. Opakováním procesu pro daný průřez součásti se postupně docílí požadované velikosti a tvaru. Dnes je nejvýznamnější nová technologie v této oblasti 3D tisk kovových součástí, viz obr.1a.

Vedle 3D tisku také vznikaly i další technologie, které jsou s aditivní výrobou kompatibilní a zatím se nedostaly do širšího povědomí veřejnosti. Mezi ně patří například 3D optická digitalizace nebo optické měřicí systémy. Optická digitalizace je metoda převedení geometrie reálného tělesa pomocí optických skenerů na polygonální síť STL. Tuto síť lze porovnat s původním návrhem součásti CAD a zjistit odchylky či nepřesnosti výroby. Zmíněné technologie jsou tedy používány na kontrolu a měření reálných součástí a pomáhají tak zajistit kvalitu výroby. Je nutno podotknout, že tyto skenery dokážou dnes nahradit většinu jiných měřicích přístrojů a disponují obdivuhodnou přesností až na jednotky mikrometrů.



a) 3D Tisk kovových součástí [6]

b) Měření deformací optickými systémy [7]

Obr. 1 3D Technologie

Podobným druhem zařízení jsou například optické měřicí systémy. To jsou většinou soustavy dvou kamer a osvětlení, pracujících současně na pořízení snímků, ze kterých lze následně vyhodnocovat posuvy nebo deformace. Tyto měřicí systémy pracují na základě metody DIC neboli digitální korelace obrazů, jejichž podstata tkví ve snímání a následném porovnávání snímků stejné scény v závislosti na čase. Pomocí těchto měřidel lze například vyhodnotit posuvy referenčních bodů při různých zkouškách, jako například při testování tlumičů u dveří auta, viz obr.1b, nebo posuvy prutové konstrukce. Je jimi také možné provést i celoplošnou analýzu povrchů, jako například průhyby kapoty automobilu za konstantně zvyšujících se teplot, nebo koncentrace napětí v různých částech vzorků v průběhu tahových zkoušek.

Tyto technologie začínají udávat standard pro průmyslovou výrobu skoro ve všech odvětvích strojírenství. Lze tedy očekávat jejich brzký průnik do běžných provozů.

1 Aдитivní výroba a 3D tisk [1], [2], [3], [4], [5], [6], [8]

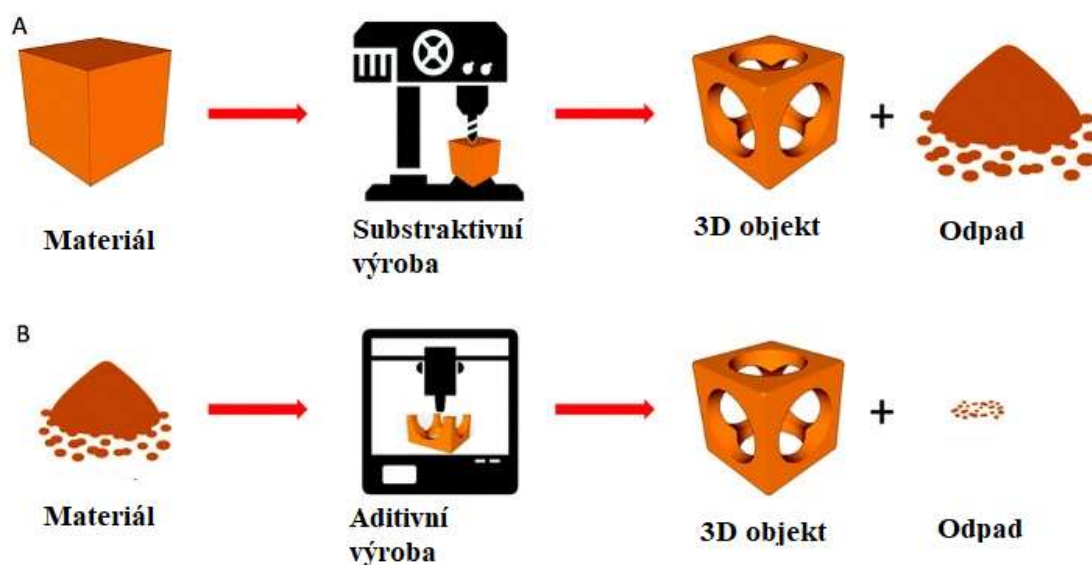
Aditivní výroba je název shrnující skupinu progresivních metod, které se zaměřují na co nejrychlejší výrobu modelů a prototypů na základě návrhů vymodelovaných v počítačovém prostředí. Mezi první metodu spadající do této skupiny se považuje Stereolitografie (SLA), vynalezená roku 1986 americkou společností 3D systems. Nejdříve je nutné nastínit tuto skupinu metod obecněji.

Aditivní výroba (additive manufacturing), také známá jako 3D tisk nebo 3D výroba, je technologie založená na postupném vrstvení materiálu a jeho následném spojování do podoby výsledného produktu. Tato technologie je aplikovatelná na téměř všechny technické materiály, mimo plastů také na kovy ale i beton nebo biomateriály. Od vynalezení této technologie v 80. letech 20. století, kdy se poprvé použila na „tisk“ plastu, se každým rokem zdokonalovala a vznikaly kolem ní inovativní metody a technologie. Dalo by se tedy říci, že aditivní technologie velmi ovlivnila a dodnes ovlivňuje vývoj technologií nejen ve všech odvětvích strojírenství, ale i v ostatních oblastech lidského působení.

Pro správné pochopení termínu aditivní výroba je vhodné odlišit její použití od konvenčních metod. Mezi konvenční metody patří například frézování, broušení nebo vrtání, tyto výrobní procesy lze jednotně nazvat jako subtraktivní, viz obr.2. Materiál se v tomto případě odstraňuje z povrchu polotovaru a kombinací různých metod dosahujeme požadovaného tvaru součásti. Oproti tomu můžeme aditivní výrobu popsat následujícími charakteristikami:

- tvar jednotlivých vrstev je převzat z modelu navrhnutého tělesa (CAD),
- v procesu není nutno speciálních nástrojů ani jejich změna při procesu vrstvení,
- materiálové vlastnosti jsou úzce spjaté s procesem výroby,
- díly lze vyrábět v řadě různých pozic s možnou přítomností podpurné struktury, což ovšem ovlivňuje výsledné vlastnosti dílu,
- všechny dnešní procesy pracují se stejnými druhy vstupních dat.

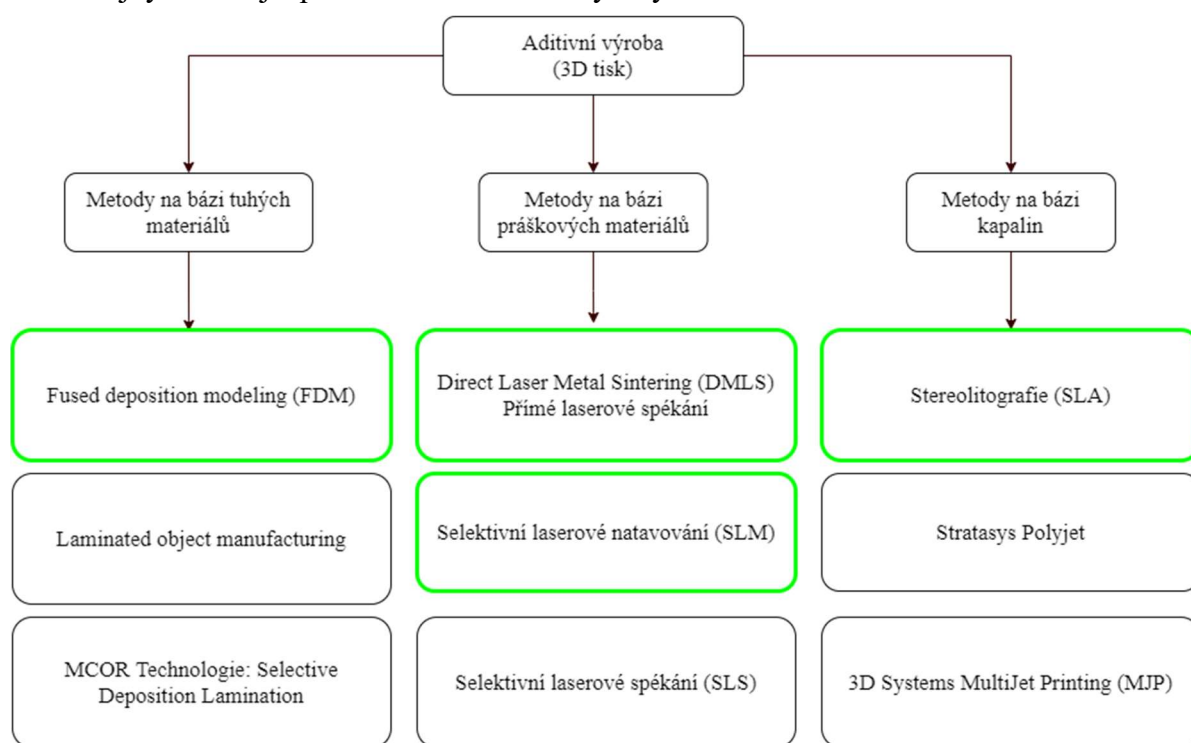
Pro tisk prototypů se používá celá škála materiálů, které jsou nejprve nataveny (nebo jinak převedeny do poddajného stavu) a pak vytvrzeny například působením laseru, v případě stereolitografie. Informace ohledně vrstev do tiskárny jsou posílány ve formě tzv. G-kódu, který se vytváří v nativním programu. Ten je určený pro danou tiskárnu a dokáže CAD model (Computer aided design) rozložit na informace ohledně jednotlivých vrstev. Kromě CAD modelů se dnes jako výchozí formát vkládaný do těchto Slicerů používán formát STL (Standard Triangle language) neboli polygonální síť bodů.



Obr. 2 Substraktivní/Aditivní metody [4]

1.1 Metody 3D tisku [1], [2]

Aditivní metoda se v literatuře vyskytuje také pod názvem Rapid prototyping (RP). Jedná se o termín, který v sobě zahrnuje rychlé navrhnutí pomocí počítačových softwarů typu CAD (Computer aided design) a následnou tvorbu dílu nebo sestavy pomocí aditivní výroby, neboli 3D tisku. Výstupní modely jsou pouze prototypy, které podstupují následné měření a korekce. Jejich výstupem bude následně návrh finálního produktu. Metody, které jsou zmíněny v této kapitole, patří mezi ty nejvýznamnější z pohledu skupenství materiálu užitého k tvorbě výsledného produktu. Na obr.3 vidíme rozdělení, podle kterého jsou metody aditivní výroby obvykle tříděny. Zeleně jsou zvýrazněné metody, které jsou v této práci popsány, a zároveň se jedná o nejvýznamnější představitele aditivní výroby.



Obr. 3 Rozdělení metod 3D tisku [2]

1.1.1 Metody na bázi kapalin [1], [2], [8], [9], [10], [11], [12]

Mezi nejvýznamnější představitele tohoto druhu vrstvení materiálu patří stereolitografie, nadále označována zkratkou SLA. Jedná se o metodu založenou na bázi fotopolymérů, která se řadí mezi nejstarší metodu patřící do kategorie 3D tisku. Metoda dosahuje solidních přesností 0,05 až $\pm 0,2$ mm na 100 mm délky prototypu. Obecně lze princip metody popsat následovně:

V pracovním prostoru, kde je napuštěná epoxidová pryskyřice (fotopolymer), je umístěna pracovní deska, která je schopná pohybu v ose Z. Deska je v pravidelných intervalech ozařována plynovým nebo pevnolátkovým laserem. Směr paprsku je ovládán soustavou zrcadel, které paprsek směřují tak, aby kopíroval oblast, která odpovídá průřezu výrobku v dané vrstvě. Informace o těchto průřezích dodává zařízení řídicí software, který tyto informace generuje z CAD designu. Poté co je vrstva hotová a pracovní prostor bezpečně zaplněn pryskyřicí (fotopolymerem) se pracovní deska posune. Rozprostření fotopolyméru zajišťuje většinou lopatka (sweeper) konající pohyb buď v ose X nebo Y na úrovni hladiny pryskyřice. Tento proces je znázorněn na obr. 5.

Fotopolymery jsou kapalné látky, které při kontaktu s různými druhy záření tvrdnou. Mezi druhy záření, na které jsou fotopolymery citlivé, patří například gamma záření, rentgenové záření nebo jako u většiny polymerů využívaných metodou SLA se jedná o UV záření.

Pracovní zařízení se skládá z:

- pracovní komory,
- počítače s řídicím softwarem,
- opticko-laserového systému (Laser, čočky, soustava zrcadel).

Metoda SLA je používána převážně při výrobě prototypů a modelů v automobilovém průmyslu, které mohou být určeny ke korekci měřicích přípravků nebo i nástrojů. Dnes si však metoda SLA našla cestu i k soukromým osobám jako alternativa k obvyklým 3D tiskárnám. Na obrázku č.4a lze vidět příklad této cenově dostupné tiskárny využívající technologii SLA, oproti tomu na obrázku č.4b lze vidět její průmyslovou alternativu.

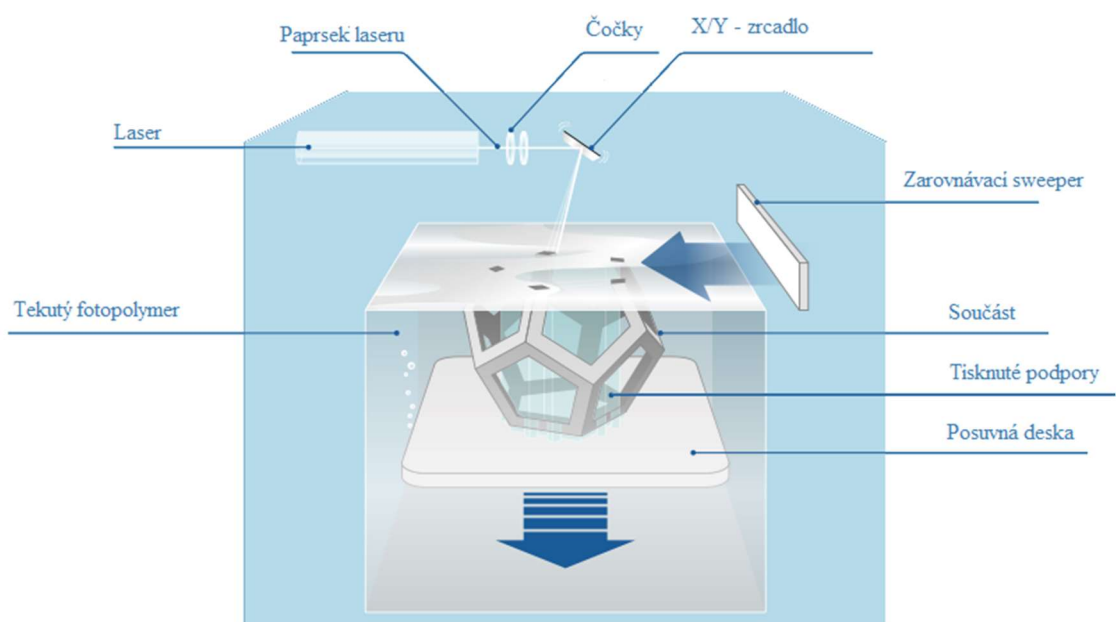


a) Domácí tiskárna SLA[9]



b) Průmyslová tiskárna SLA [10]

Obr. 4 Tiskárny využívající technologii SLA



Obr. 5 Ilustrace tisku metodou SLA [12]

Metoda SLA má samozřejmě své výhody a nevýhody. Mezi přednosti této metody patří:

- tiskárny založené na této technologii mohou být v provozu prakticky neomezenou dobu bez potřeby dozoru.
- tiskárny mají širokou škálu velikostí pracovních ploch, od 250 x 250 x 250 mm až po 1500 x 750 x 550 mm.
- mají velmi dobrou rozměrovou přesnost tisknutých modelů,
- oproti jiným aditivním technologiím má metoda SLA dobrou jakost povrchu,
- metoda SLA disponuje velkým rozsahem použitelných materiálů, od základních až po specializované, se zaručenými materiálovými vlastnostmi.

Mezi nevýhody stereolitografie patří:

- metoda vyžaduje tisk podpůrných konstrukcí a mnohdy daná aplikace vyžaduje uživatelem definované podpory,
- metoda vyžaduje nutnost opracování po vytisknutí součásti, což zahrnuje odstranění podpor, které mohou model poškodit,
- je nezbytné také následné vytvrzování, které je stejně jako předchozí operace časově náročné.

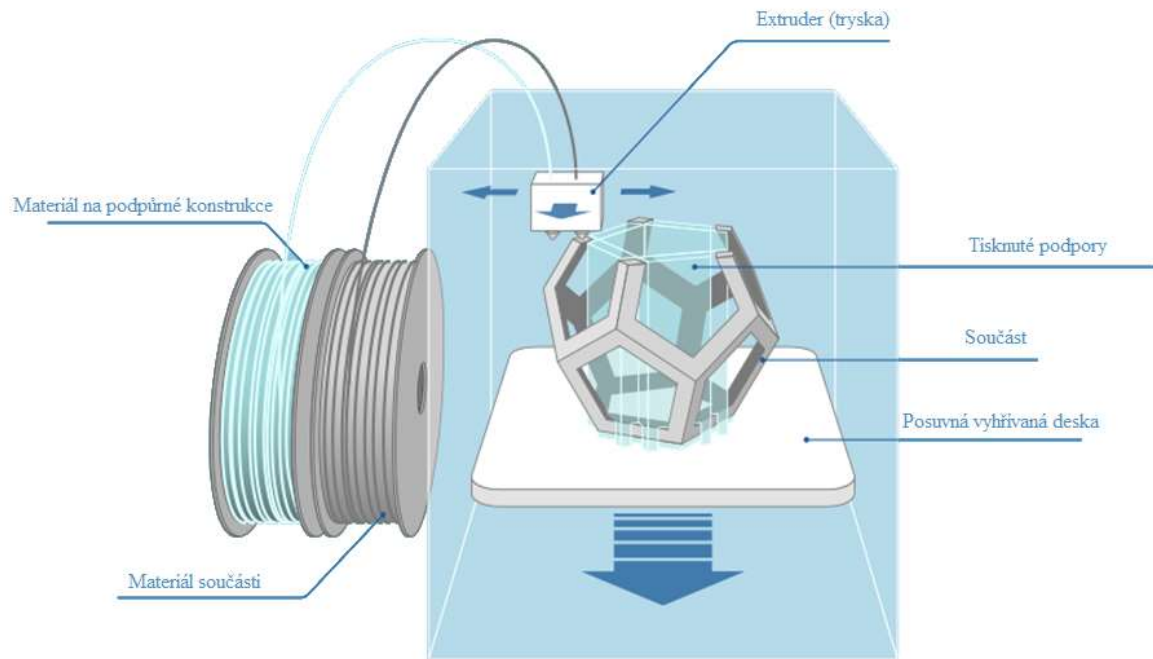
1.1.2 Metody na bázi pevných látek [1], [2], [4], [8], [13], [14], [15], [16]

Nejpřednějším zástupcem této skupiny je technologie Fused deposition modeling (FDM). Tato metoda tisknutí materiálu se řadí mezi nejběžnější technologii rapid prototyping, jednak svojí dostupností pro soukromé osoby, ale hlavně díky přesnostem, kterých dosahuje v dané cenové relaci. Tiskárny využívající metodu FDM jsou velice rozšířené a rozměry výsledných výrobků se pohybují od několika milimetrů až po metry.

Na obr.7a lze vidět cenově dostupnou tiskárnu od firmy PRŮŠA, oproti tomu na obr.7b (vpravo) je tiskárna určená do automobilového průmyslu na výrobu prototypů, která je od firmy STRATASYS.

Princip této metody by se dal popsat následovně: Tisknutý drát (filament), který je navinutý na kotouči, viz obr.6, je pomocí sady kladek vtahován do vyhřívané trysky, která jej následně nataví. Kombinací pohybu stolu, který je většinou omezen na jeden stupeň volnosti do osy Z nebo X/Y a pohybu trysky, která většinou ovládá pohyby ve zbylých osách, je materiál nanášen v pravidelných vrstvách na pracovní plochu. Plocha pokrytá materiálem kopíruje průřez CAD modelu v dané vrstvě. Postupným vrstvením materiálu, který při kontaktu se vzduchem tuhne, vzniká konečný tvar. Během tohoto procesu je často nutné tisknout také podpory, které zabrání nežádoucím deformacím při tisku. Podpory se následně odstraňují mechanicky nebo chemickou cestou.

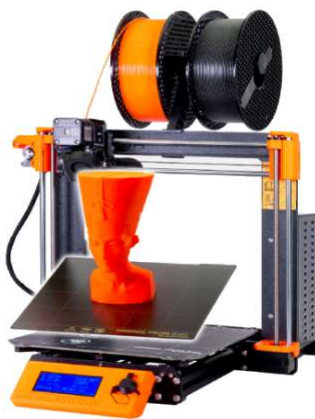
Pro úsporu nákladů na používané materiály jsou tyto tiskárny často vybaveny dvěma nebo i více zásobníky na filamenty. Jeden je určen na tisk požadovaného výrobku, druhý obsahuje levnější materiál, který slouží k tisku potřebných podpor. Na obr. 6 je vidět princip této metody.



Obr. 6: Znárodnění metody FDM [14]

Pracovní zařízení těchto tiskáren se skládá z:

- vyhřívané desky (heat bed),
- trysky (extruder) natavující materiál,
- série elektromotorů ovládajících osy.



a) Cenově dostupná FDM 3D tiskárna [16] b) FDM Tiskárna pro automobilový průmysl [15]

Obr. 7 Tiskárny využívající technologii FDM

Obvykle se tato metoda používá k tisku plastových materiálů. Volba materiálu úzce souvisí s nastavením tiskárny a zejména s teplotou podložky a trysky. Nejobvyklejší z těchto materiálů jsou:

- Kyselina polymléčná neboli PLA (polylactic acid) je biologický materiál velice pružný a pevný, vyráběný ze škrobu, který je čím dál častěji průmyslově využíván.

Teplota trysky: 150 – 210 °C

Teplota podložky: 0 – 60 °C

- Akrylonitrilbutadienstyrenneboli ABS je amorfní termoplastický polymer, který je velice tuhý a houževnatý, a také odolný vůči vysokým teplotám.

Teplota trysky: 220 – 275 °C

Teplota podložky: 100 – 130 °C

Stejně jako metoda SLA se metoda FDM používá v praxi zejména na tvorbu prototypů, které následně podstupují kontrolu a měření tvaru, funkčnosti i jiné testy. Jako největší přínos této technologie lze považovat její využití ve školství, například na technických a uměleckých školách, kde umožňuje převedení jinak čistě počítačové výuky do reality.

Metoda FDM má samozřejmě také své výhody a nevýhody. Mezi výhody patří:

- s využitím metody FDM dokážeme dělat nejen prototypy věrně simulující vlastnosti konečných součástí, ale také generovat plně funkční součásti s použitím materiálu ABS.
- Oproti jiným metodám na bázi tuhých materiálů dokáže FDM metoda zajistit výsledek bez velkého odpadu v podobě podpor a jiných pomocných prvků.
- V případě použití podpor je možné je tisknout z jiného (levnějšího) materiálu, čímž nejen snižuje cenu, ale zajišťuje i jednoduché odstranění těchto pomocných prvků.
- Oproti metodě SLA je v tomto případě jednoduchá výměna materiálu.
- FDM tiskárny se vyrábí ve velké šíři nabízených pracovních ploch.

Mezi nevýhody 3D tisku metodou FDM patří:

- Oproti metodě SLA dosahuje tato technologie jen omezených přesností, zejména je tomu tak kvůli rozměrům filamentu, který máme v tiskárně zaveden.
- Ve srovnání s ostatními technologiemi se jedná o velice pomalý proces tisku v případě, že chceme dělat celistvé součásti bez redukované vnitřní výplně.
- V průběhu tisku dochází k nepředvídatelnému smršťování materiálu.

1.1.3 Metody na bázi práškových materiálů [1], [2], [5], [6], [8], [17], [18], [19], [20], [21]

Tuto kategorii rozdělíme do dvou subkategorií podle spojení prášků, a to na metody užívající slinování kovových prášků a metodu tavení materiálu. Metody užívající slinování (anglicky sintering) prášek spojují nahřátím práškových částic na vysokou teplotu těsně pod bodem tavení. Tímto působením se prášek k sobě spojí neboli sline. Mezi typické představitele patří selektivní laserové spékání (SLS) nebo přímé laserové spékání popisované v následujícím odstavci.

Přímé laserové spékání neboli sintrování známé pod zkratkou DMLS (direct metal laser sintering), je jedna z nejúčinnějších metod rapid prototyping pro zpracování kovu. Jedná se o přímé laserové slinování kovů. Na rozdíl od jiných metod tisknutí kovů lze touto metodou

vyrábět předměty z téměř jakékoliv kovové slitiny (hliník, bronz, kobalt-chrom, titan, keramika). Tyto materiály se používají výhradně v práškové formě.

Na obr. 8 je možné vidět tiskárnu od firmy XactMetal, model XM200C, která se pyšní technologií DMLS, které je popisované na následujících stránkách. Metoda přímého laserového spékání má své podobnosti s metodou SLA, jejich princip je do jisté míry podobný.

V pracovní komoře se za konstantní přítomnosti inertního plynu nanáší velmi tenká vrstva práškového materiálu na pracovní plochu tiskárny. Tato plocha je zahřívána na teplotu pod bodem tání kovu. V této chvíli začne na tenkou vrstvu v pravidelných tvarech kopírujících průřez daného výrobku v dané výšce, působit laser, který materiál lokálně nataví. Když je průřez hotov, pracovní plocha se posune směrem dolů proti směru osy Z a umožní, aby sweeper (viz SLA) vykonal pohyb ve směru osy X/Y (záleží na konstrukčním řešení tiskárny) a nanese novou vrstvu prášku. Následně se proces opakuje. Laser se systematicky „dotýká“ výtisku a slinuje jednotlivé vrstvy dohromady. Hrubý postup metody DMLS lze vidět na obr.9.

Pracovní zařízení se skládá z:

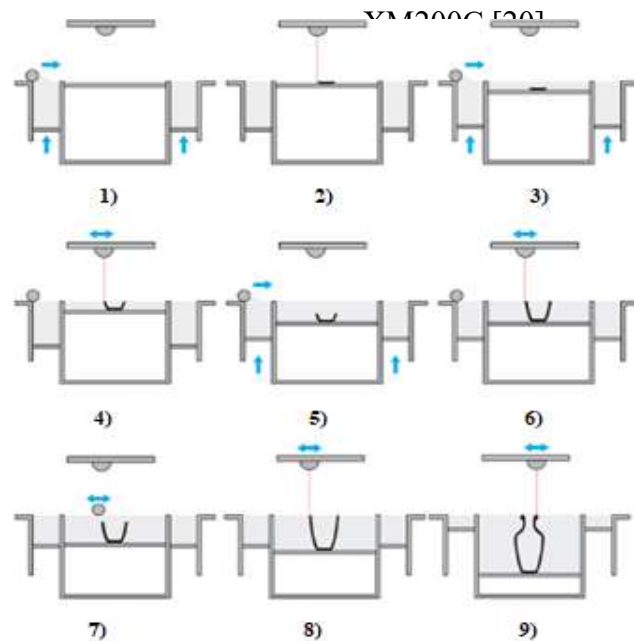
- pracovní plochy,
- systému podávání a nanášení prášku,
- počítače s řídicím softwarem,
- opticko-laserového systému (laser, čočky, soustava zrcadel),
- zásobníku inertního plynu.

V tiskárnách tohoto typu dokážeme ve formě kovového prášku zpracovávat celou řadu materiálů. Kovový prášek je esencí kovového 3D tisku. Ačkoli je manipulace s ním v surovém stavu obtížná a nebezpečná, díky svým jedinečným vlastnostem se jedná o nejpoužívanější metodu zpracování kovů pomocí 3D tisku, například těchto:

- nerezová ocel: 316L, 17-4 PH, 15-5,
- super slitiny: 718, 625, kobalt chrom F75,
- nástrojové oceli: Maraging M300,
- bronz, měď C18150,
- hliník Si10Mg a titan Ti64.



Obr. 8 SLM/DMLS tiskárna XM200C 5203



- 1) rozprostření vrstvy prášku
- 2) spečení vrstvy
- 3) - 9) opakování procesu

Obr. 9 Princip metody DMLS [19]

V posledních letech proslula tato metoda zejména v oblasti prototypů, které dokáží věrně simulovat mechanické vlastnosti součástí a budou následovně vyráběny jinou konvenční metodou. DMLS našla uplatnění v automobilovém, leteckém nebo dokonce elektronickém průmyslu. Jedno z obvyklých použití může být tisknutí vložek, které se vsouvají do předem vyfrézovaných dutin forem na odlévání nebo kování.

Stejně jako u jiných aditivních výrob i metody zpracovávající kovový prášek přichází se svými charakteristickými klady a zápory. Mezi přednosti patří například:

- Vysoká pevnost a celkové mechanické vlastnosti, které se blíží součástkám vyrobeným konvenčními metodami.
- Široké rozpětí použitelných materiálů v případě, že jsou dostupné v práškové podobě.
- Tisknutí komplikovaných geometrií je možné bez použití podpor.
- Následné opracování součástí je minimální, v některých případech je pouze kosmetické.

Nevýhody této metody jsou většinou ekonomického charakteru a patří mezi ně například:

- Prostorově a energeticky náročné zařízení k jehož plnému využití je nutné bezpečné a čisté prostředí.
- Ekonomická náročnost jak z pohledu energetického, tak z pohledu zásobování materiálu a inertních plynů.
- Kvůli velikosti prachových částic v pracovní komoře je jakost povrchu omezená.

Metoda příbuzná spékání je také metoda natavování, která, jak název napovídá, zpracovává kovový prášek přivedením vrstvy nad teplotu tavení společně s částečným natavením vrstvy předešlé. Mezi nejběžnější metody patří metoda přímého laserového natavování neboli DMLM, která je obdobná technologii DMLS. Tyto metody jsou často přítomny jako nastavení na stejných zařízeních, tedy tiskárna na slinování prášku je mnohdy uzpůsobená i na provedení celkového natavení materiálů. Jako zástupce byla v tomto případě zvolena metoda SLM neboli selektivní laserové natavování.



a) kloubní náhrada [17]



b) průmyslové tiskárny SLM [17]

Obr. 10 Zařízení a využití tiskáren SLM

Metoda SLM je stejně jako metoda DMLS určena ke spojování kovových, popřípadě keramických prášků. Selektivní laserové tavení umožňuje oproti jiným metodám tisknutí komplexních geometrických tvarů, aniž by došlo k výraznému snížení mechanických vlastností. V současnosti se tato metoda čím dál častěji objevuje v oblastech zdravotnictví. Díky schopnosti tisknout slitiny na základě hliníku, niklu a především titanu se tato metoda dokázala usadit ve zdravotnickém sektoru, především na výrobu implantátů nebo zubních náhrad. Obvyklé části tiskárny jsou obdobné jako u technologie DMLS. Na obrázku č.10b je zobrazena průmyslová tiskárna tohoto typu, na pravém obrázku č.10a je znázorněna kloubní náhrada, k jejíž výrobě tato tiskárna často slouží. Systém pracuje téměř stejným způsobem jako metoda DMLS, rozdílem je, že kovový prášek se v místě ozařovaném laserem plně roztaví.

Mezi výhody metody SLM patří:

- vysoká kvalita tisknutých součástí,
- velká rozmanitost tisknutelných materiálů,
- malé až nulové následné opracování po tisku,
- tisk komplexní geometrie a tvarově složitých součástí,
- solidní přesnost.

Nevýhody jsou podobné jako u metody DMLS víceméně ekonomického charakteru:

- rozměrově a energeticky náročné zařízení, viz DMLS,
- relativně dlouhá doba tisknutí součástí.

Srovnání všech výše uvedených metod 3D tisku bylo v podobě tabulky umístěno do přílohy.

1.2 Zkoušení tisknutých součástí [5], [22]

Pro zkoušení aditivně vyrobených součástí se používá celá řada metod, mezi nejvýznamnější patří zkouška tahem nebo tlakem a zkouška tvrdosti. V případě testu tahem zkoumáme plastické a elastické chování materiálu podle vzniku krčku (zúžení průřezu), nebo podle vzniku soudečku (zvětšení průřezů) při zkoušení tlakem. V případě zkoušky tvrdosti se použítá metoda volí dle materiálu a používá se zejména měření dle Vickerse, Brinella nebo Rockwella.

Z těchto zkoušek je nejvýznamnější a zároveň nejběžnější zkouška tahem, která je používána k vyhodnocení pevnosti a plasticity materiálu. Zkouška spočívá v deformaci tělesa zatěžováním normovanou předepsanou rychlostí na tah a provádí se za pokojové teploty od 10-35 °C. Tato zkouška probíhá na univerzálních zkušebních strojích, které jsou většinou variabilní a umožňují různé rychlosti posuvu a různé způsoby zatěžování. K vyhodnocení tahových zkoušek je nutné mít údaje ze snímačů zkušebního stroje (popř. informace z extenzometrů), pracovní diagram generovaný tahovým zkušebním strojem a dimenze testovaného objektu.

Stejně jako u zkoušení konvenčních materiálů zajímají uživatele veličiny jako například:

- **Mez kluzu (R_e)** – Napětí, při kterém dochází k prvnímu projevu plastické deformace.
- **Smluvní mez kluzu ($R_{p0,2}$)** – Napětí, při kterém dosáhne vzorek smluvní hodnoty prodloužení. Nejčastější hodnota prodloužení bývá 0,2 %.
- **Mez pevnosti v tahu (R_m)** – Hodnota odpovídající maximálnímu napětí dosaženého před přetrhnutím tyče.
- **Tažnost (A)** – Jedná se o trvalé prodloužení tyče měřené po přetržení, vyjádřené procentuálně vůči délce v nezatíženém stavu.
- **Koncentrace (Z)** – jedná se o největší změnu průřezu po přetržení, vyjádřené procentuálně vůči rozměru průřezu v nezatíženém stavu.
- **Tvrdost (HV, HB, HRC)** – schopnost materiálu odolávat plastické deformaci.

Jako podpora vyhodnocování materiálových vlastností se často používají optické systémy, které dokáží vizualizovat průběh deformace na celé ploše vzorků.

2 Optické měřicí systémy [7], [23], [24], [25]

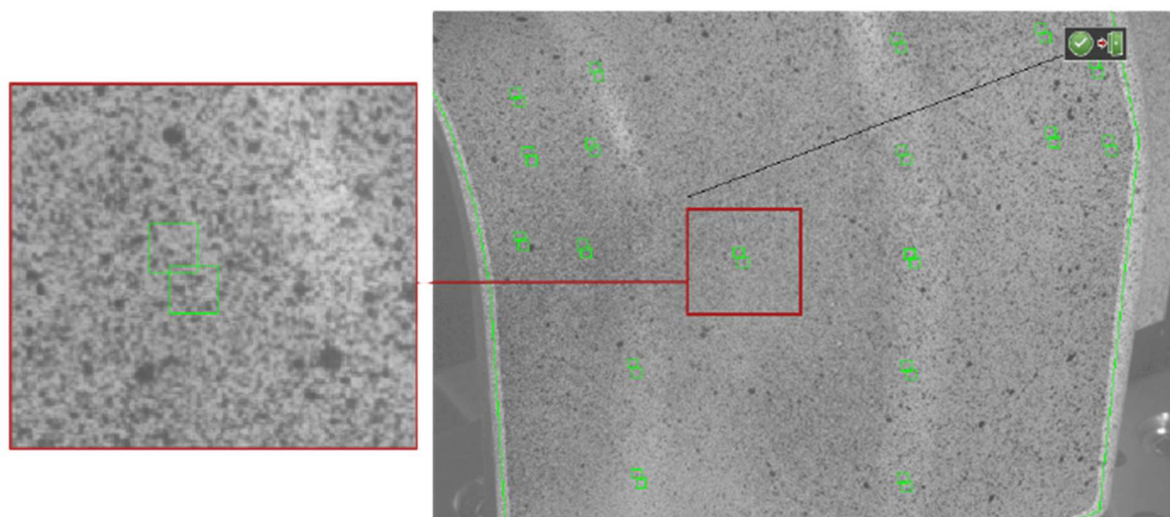
Optické měřicí systémy jsou obecně bezkontaktní měřidla, která v jednom zařízení často kombinují řadu přístrojů z obvyklých metod měření. Tyto systémy začínají udávat standard v různých odvětvích průmyslové výroby, zejména pak v automobilovém průmyslu, kde se optická měřidla využívají ke kontrole jednotlivých součástí, a to buď z mechanického hlediska nebo pro kontrolu rozměrů. Lze je však také využít jako výslednou kontrolu smontovatelnosti součástí. Tyto systémy nabírají na popularitě zejména díky jejich rychlosti a přesnosti měření.

Optické měřicí systémy mají většinou specifické vlastnosti, které se využívají na určité aplikace, jako je například generování diagramů mezní tvářitelnosti neboli FLD (Forming limit diagram), vyhodnocování posuvů bodů či inspekce deformací.

2.1 Digitální korelace obrazů [7], [25], [26], [27], [28]

Digitální korelace obrazů neboli DIC (Digital image Correlation) je inovativní bezkontaktní optická metoda měření určená na vyhodnocování deformace a posuvů. Digitální korelace je metoda, kterou je možno použít na nejrůznější aplikace napříč strojírenským průmyslem. Je tomu tak hlavně díky jednoduchosti a efektivnosti této metody oproti konvenčním metodám měření. Digitální korelací dokážeme sledovat například referenční body, které jsou při pořízení snímku zakódovány a následně je pozorován jejich pohyb vůči sobě. Zajímavější aplikace této metody je při použití stochastického nástřiku, který je pro pochopení digitální korelace ideální.

V takovém případě DIC funguje na základě skládání pořízených digitálních fotografií testovaného objektu na sebe a porovnání posuvů bodů zájmu v čase (v průběhu deformace nebo posuvu). Tyto děje jsou pozorovány na základě pohybu bloků pixelů (takzvaných facet), což jsou soustavy pixelů čtvercového tvaru. V geometrickém středu těchto facet je umístěn bod, který v kombinaci s ostatními facetami dává dohromady soustavu bodů tvořící povrch. Pro správný postup metody DIC je nutné zajistit náhodné pixelové bloky většinou v podobě stochastického nástřiku (náhodný nástřik černé na bílé pozadí). Kontrast bílé a černé barvy je v tomto případě ideální a zároveň nezbytný, jelikož zprostředkovává různé odstíny šedi v daných facetách. Facety jsou díky tomu jedinečné a je možné je identifikovat v různých stádiích deformace.



Obr. 11 Stochastický nástřik a facety [27]

V případě zařízení jako je Aramis jsou facetky, které mají čtvercový tvar, nastavené na základní rozměr 19x19 pixelů. Rozměr facet je odvozený většinou od konkrétní aplikace a nastavuje jej uživatel v rozmezí od 12x12 až do 40x40 pixelů. Nastavení tohoto parametru má samozřejmě své výhody a nevýhody.

Je-li velikost facety větší než přednastavená hodnota:

- zvyšuje se výpočetní čas,
- zhorší se detekce lokálních dějů,
- zlepší se přesnost měření souřadnic.

V případě, že facety jsou menší, než 19x19 pixelů dochází k:

- zkrácení výpočetních časů,
- lepší detekci lokálních dějů,
- zhoršení přesnosti měření souřadnic.

Další parametr, který je úzce spjatý s přesností měření, je velikost vzdálenosti jednotlivých facet (jejich překrytí). Tento parametr ovlivňuje hustotu pokrytí povrchu facetami. Překrytí se obvykle volí podle nastavení rozměru facet a požadavků experimentu s tím, že základní hodnotou bývá překrytí 2 pixely. V případě, že je překrytí větší než základní hodnota, dochází při měření k:

- zkrácení výpočetních časů,
- horší detekci lokálních jevů,
- menší hustotě pokrytí povrchu facetami.

Pokud je překrytí menší než základní hodnota:

- větší hustota pokrytí povrchu facetami,
- větší výpočetní časy,
- lepší detekce lokálních jevů.

Velkou výhodou této metody je možnost nastavení výše zmíněných parametrů tak, aby bylo možné z pořízených dat získat co nejvíce informací. Kromě toho nám celoplošná analýza zaručuje hodnoty nejen z bodů zájmu, ale také z jejich okolí. Mimo to metoda nevyžaduje žádné speciální druhy osvětlení jako je tomu u jiných metod měření deformací.

Metoda DIC je aplikovatelná i na měření pomocí metod úprav povrchu v další kapitole.

2.2 Příprava součástí pro optické měření [7], [28]

Veličiny, které z optického měření dokážeme získat se odvíjí od způsobu úpravy povrchu. Podle toho také určíme zařízení pro konkrétní použití. Zajímá-li nás například pouze pohyb referenčních bodů, bude objekt upraven pomocí referenčních značek. V této i v dalších kapitolách budou zmíněny úpravy charakteristické pro zařízení od firmy GOM.

2.2.1 Stochastický nástřík [28]

Jedná se o náhodný kontrastní nástřík černé barvy na bílý podklad nebo naopak. Byl již důkladně popsán v kapitole o digitální korelaci obrazů DIC.

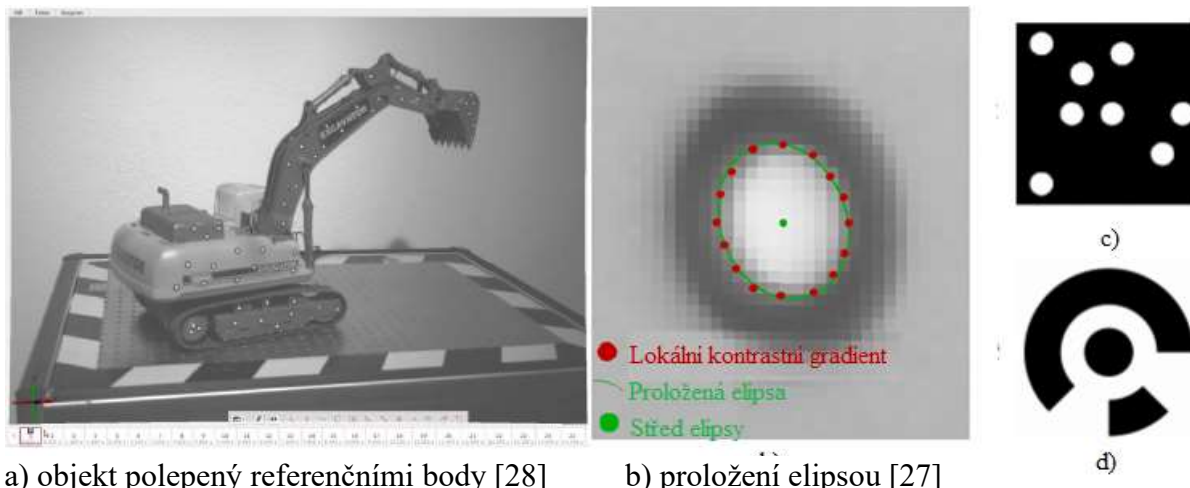
2.2.2 Referenční body kódované a nekódované [28], [29]

Referenční body nekódované jsou nejobvyklejším způsobem přípravy povrchu před měřením. Jedná se o značky, kterými se polepí povrch testované součásti, ve kterých systém může se zaručenou přesností vytvořit bod. Na obr.12a je takový objekt ukázán.

Bod na značkách je vytvořen v softwaru. Ten dokáže identifikovat polohu zřetelného přechodu z černé na bílou, tomuto přechodu se říká „gray value“. Přechodem barev je proložená elipsa, pro kterou software nalezne střed. Střed elipsy je považován za bod v následující inspekci. Na následující obrázku č.12b je tento proces vidět.

Kódované body jsou druhy značek pomáhající zejména při fotogrammetrickém měření k orientaci snímků v prostoru. Jsou většinou vyráběny z retro-reflexního materiálu k dosažení dobrého kontrastu bílé a černé v různých světelných podmínkách. Tyto body mají ve svém tvaru speciální identifikátor, což činí každý bod unikátním. Tyto body se využívají k orientaci

fotogrammetrických měření a mohou udávat měřítko fotografií. Existují dva druhy fotogrammetrických bodů, které se v praxi používají, jedná se o kruhové a čtvercové uspořádání. Oba druhy mají své výhody a nevýhody, nejvýznamnější rozdíl ovšem je, že čtvercové uspořádání poskytuje možnost většího počtu unikátních kódovaných bodů, zatímco kruhové mají výrazně nižší počet uspořádání, ale obecně zajišťují lepší přesnost měření. Tudíž pro velké aplikace (například budovy), se používají čtvercové, viz obr. 12c a pro malé až střední aplikace (od malých součástí až po auta, letadla atd.) jsou vhodnější kruhové (viz obr. 12d).



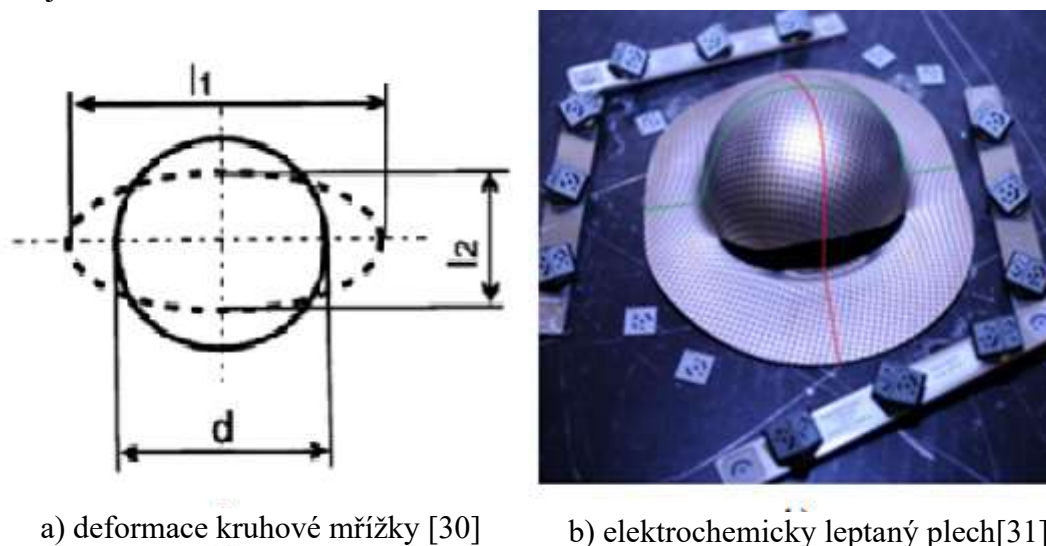
a) objekt polepený referenčními body [28]

b) proložení elipsou [27]

Obr. 12 Referenční body: d) kódovaný kruhový bod [29], c) kódovaný čtvercový bod [29]

2.2.3 Měrné sítě [24], [30], [31]

Pro přípravu plechů se používají deformační sítě, na jejichž základě dokážeme zjistit přetvoření nebo stupně napjatosti. Tuto síť nanese na povrch plechu před vylisováním, aby se síť deformovala s ním. V případě použití jednoduché kruhové mřížky (obr.13a) zanechává proces deformace elementy této sítě deformované do tvarů elipsy. V takovém případě delší poloosa elipsy udává hlavní napětí (hlavní směr deformace). Nejběžnější metodou aplikace těchto mřížek na povrch plechu je elektrochemické leptání. Příklad mřížky na konkrétním výlisku je možné vidět na obrázku č. 13b.



a) deformace kruhové mřížky [30]

b) elektrochemicky leptaný plech[31]

Obr. 13 Měření systémem Argus

Kruhové mřížky se používají zejména díky jednoduchosti vyhodnocení. Změříme pouze poloosy elipsy a pomocí vzorců pro poměrnou deformaci jsme schopni zjistit, jak se v dané

oblasti plech chová a je-li v oblasti nebezpečí výskytu trhlin. Vzorce pro poměrnou deformaci zní:

$$\varepsilon_{Tlak} = \frac{\Delta l_2}{d} = \frac{l_2 - d}{d} \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_{Tah} = \frac{\Delta l_1}{d} = \frac{l_1 - d}{d} \quad (2.2)$$

kde: $\varepsilon_{Tlak/tah}$ – poměrná deformace [-],
 d – průměr kruhu mřížky [mm],
 l_1 – rozměr hlavní poloosy [mm],
 l_2 – rozměr vedlejší poloosy [mm].

Z výše uvedených vzorců je vidět, že poměrná deformace je definována jako změna rozměru kruhu vůči jeho původní velikosti.

2.3 Zařízení pro kontrolu a měření [32]

V této kapitole budou zmíněna zejména zařízení od firmy GOM, jakožto jednoho z nejrozšířenějších zástupců zprostředkovávajícího optické měřicí systémy jak v České republice, tak ve zbytku světa.

GOM skupiny Zeiss se specializuje na průmyslovou 3D měřicí technologii, počítačovou tomografii a 3D testování. Společnost již řadu let udává mezinárodní standardy v optické 3D metrologii, pomáhá optimalizovat procesy a vyrábět efektivněji. Od roku 2019 je součástí Zeiss group, která se svou dlouholetou tradicí vede technologický vývoj v oblasti optiky a optoelektroniky už řadu let na evropské i celosvětové úrovni. Produkty této firmy se prosadily v nejrůznějších odvětvích strojírenství jako například energetika, letecký či automobilový průmysl nebo při výrobě spotřebního zboží. Jsou dokonce v mnoha podobách zastoupeny i na Fakultě strojního inženýrství v Brně a na mnoha jiných prestižních univerzitách po celém světě. Mezi jejich produkty patří:

2.3.1 ARAMIS [7], [25], [33]

Aramis je optický stereo kamerový systém, který je založený na digitální korelaci obrazů. Na základě triangulace dokáže přesně určovat souřadnice v prostoru pomocí stochastického nástřiku nebo referenčních bodů.

Tento stereo systém je, jak název napovídá, založen na vzájemné spolupráci dvou vysokorychlostních kamer s vysokým rozlišením, které jsou umístěny na jednom rameni. Další důležitou součástí zařízení je osvětlení, které je zajištěno pomocí projektoru modrého světla nebo pomocí speciálního prstencového osvětlení „tracking spots“, které je umístěné kolem kamery a je ovládané frekvencí snímání v průběhu měření. Zařízení je dostupné v mnoha různých konfiguracích, které je možné nastavit podle požadavků uživatele. Na obr.14 lze vidět tři různé konfigurace zařízení nesoucí stejné označení.



a) Aramis Adjustable [33]



b) Aramis SRX s projektorem modrého světla [7],



c) Aramis SRX s osvětlením tracking spots [7]

Obr. 14 Varianty zařízení Aramis

Zařízení je určeno pro provedení zkoušek, jejichž výsledky zprostředkovávají informace o chování dílu. Výhodou tohoto systému je, že bez ohledu na materiál součásti dokáže vyhodnotit všechny potřebné parametry v kontextu geometrie celé součásti, což například u standardních tenzometrů není možné. Díky vysokorychlostním kamerám lze systém použít i na dynamické děje jako například vibrační analýzy nebo nárazové zkoušky. Na druhou stranu se i hodí na víceméně statické zkoušky jako je například zkouška tahem. Nově je dokonce systém schopen kombinovat provedené měření s daty pořízené termokamerami, takže kromě standardních průběhů deformací lze vyhodnocovat i tepelné jevy. V softwaru nesoucím stejné jméno jsou všechny tyto možnosti dostupné s možností importování CAD modelu, nebo porovnání s matematickými simulacemi. Systém Aramis je použitelný na různé aplikace, viz obr.15, významné z nich jsou například:

- V biomechanice se Aramis používá zejména na určování pohybů a deformací tělesných náhrad a implantátů, měkkých tkání a kostí nebo ortéz.
- V automobilovém průmyslu je tento systém možné vidět při různých částech výrobního procesu, mezi typické příklady patří například zkoušky odolnosti (dveří, krytů motoru), analýza chování motorů a převodovek, testy v aerodynamickém tunelu.
- Letecký a kosmický průmysl je také častým místem, kde se tato technologie využívá, například je důležitá při strukturálních zkouškách skořepin trupu letadla, při měření deformací křídel, nebo lopatek motorů.



Obr. 15 Měření pomocí zařízení Aramis 3D Camera [7]

2.3.2 TRITOP [34], [35], [36], [37]

Zařízení Tritop a Argus jsou v mnoha ohledech podobné a měřicí procedurou dokonce stejné. Jedná o sadu v podobě fotoaparátu v kombinaci s kalibračními tyčemi a kódovanými body, viz obr.16a. Tritop se užívá zejména pro zaručení nebo zvýšení přesnosti měření a ačkoliv je možné jej použít samostatně, je většinou používán v kombinaci s jiným zařízením.

Systém Tritop je bezkontaktní fotogrammetrický měřicí systém určený na snímání diskrétních bodů. V technické praxi se fotogrammetrické systémy používají pro kontrolu kvality, nebo také pro kontrolu tvaru hran při tváření plechů, či při prvotní kontrole plastových dílů. Je možné použít tyto systémy i při deformační analýze. Tyto aplikace jsou samozřejmě limitované na hodnoty pouze v diskrétních bodech, nebo hromadných posuvech mraků bodů. Limitace na konkrétní body je ovšem výhodou při použití jiných zařízení jako například Aramis, kdy můžeme zaznamenat polohu bodů před zahájením měření a pozorovat tak pohyb bodů, které jinak nejsou v záběru zařízení.

Systém se podobně jako systém Argus skládá z kalibračních tyčí, fotoaparátu, kódovaných a referenčních bodů a výkonného počítače.

Aplikace systému Tritop, viz obr 16b:

- Zkoušky tepelné roztažnosti,
- Testy airbagů,
- Stárnutí a zátěžové testy,
- Deformace a testování součástí,
- Optimalizace a ověření simulací.



a) sada Tritop/Argus [36]



b) Tritop při digitalizaci historického vozu [37]

Obr. 16 Systém Tritop

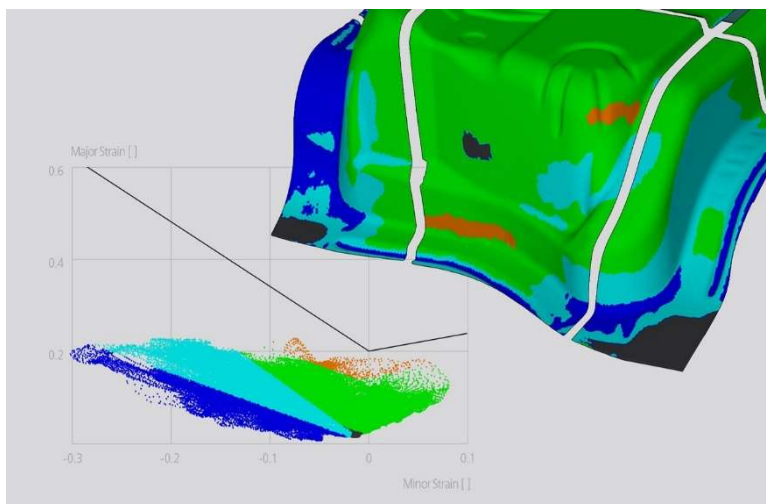
2.3.3 ARGUS [24]

Argus je bezkontaktní optický systém určený na získávání dat z lisovacích procesů. Senzor v podobě fotoaparátu zaznamenává měrnou síť bodů, které mohou nabývat průměrů od 1 do 6 mm. Na základě zákona o zachování objemu je možné pomocí tohoto zařízení a stejnojmenného softwaru získat data o hlavním a vedlejším přetvoření, redukci tloušťky a vygenerovat diagram mezní tváritelnosti FLD. Výstupem z tohoto zařízení a softwaru je barevná mapa na geometrii testovaného plechu (obr. 17).

Aplikace systému Argus:

- optimalizace tvářecích procesů,
- ověřování a kontrola opotřebení nástrojů,
- kontrola shody s numerickými simulacemi,
- identifikace kritických oblastí.

Na obrázku č.15b v kapitole o měrných sítích je znázorněný plech připravený na měření pomocí tohoto systému. Na obrázku také můžeme vidět rozmístěné kostky se znaky. Jedná se o kódované body, které pomáhají orientovat pořízené snímky v prostoru. Na označených tyčích jsou dva body, které jsou kalibrovány tak, aby měly od sebe přesnou vzdálenost, podle kterých software rozezná rozměry plechu.



Obr. 17 Výstup z měření pomocí zařízení ARGUS [24]

2.3.3 ATOS [23], [38], [39]

Ačkoliv tento optický systém většinou již není používán na vyhodnocování deformací, je to významný produkt firmy GOM. Zařízení je kompatibilní se softwarem Aramis a lze s ním vyhodnocovat metodou DIC. Většinou je ale používán na optickou digitalizaci součástí a porovnávání výsledných STL souborů s CAD modelem.

Těmto zařízením se říká 3D skenery. Proces digitalizace probíhá tak, že se na upravený povrch, zmatněný například pomocí oxidu titaničitého TiO_2 , nalepí referenční značky a skener začne na povrch součásti promítat proužky světla, které jsou snímány CCD kamerami z různých úhlů. Tímto způsobem se pomocí triangulační metody a postupu digital image processing

vytvoří mrak bodů, který nezávisle na sobě umožní přesně vypočítat souřadnice každého pixelu na snímané součásti. Příklad tohoto měření je zobrazen na obr.19, kde byl digitalizován historický automobil od firmy Škoda.



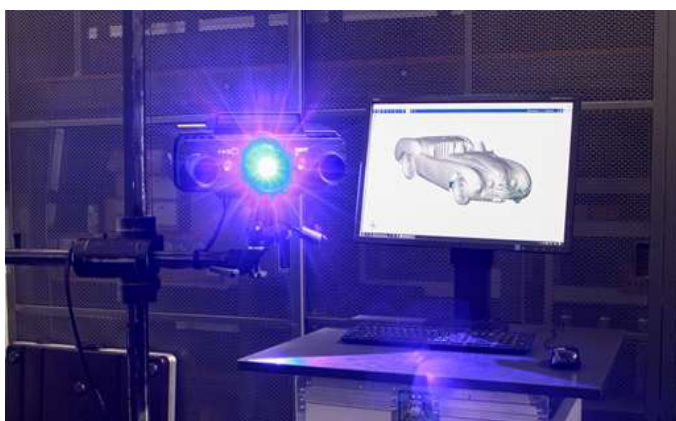
a) Atos Q [23]



b) Atos 5 [38]

Obr. 18 Optické skenery

Dnes existuje velké množství těchto zařízení, mezi posledními modely od firmy GOM je to ATOS Q a ATOS 5, které ačkoliv mají své výhody, v některých konkrétních oblastech jsou víceméně univerzální pro malé až velké aplikace. Na obr.18 jsou tyto skenery zobrazeny.



a) digitalizace automobilu Škoda Sport [39]



b) výtisk automobilu FDM metodou [39]

Obr. 19 Použití systému Atos

3 Návrh a zkoušení vzorků pro kovový 3D tisk

Pro lepší pochopení technologií popsaných v předchozích kapitolách je zbytek této práce věnován návrhu a tisku vzorku pro tahovou zkoušku na tiskárně XactMetal.

Tisknutý materiál je austenitická nerezová ocel 316L, jedná se o ocel obsahující mimořádně malé množství uhlíku na svoji kategorii. Díky tomu je i odolná vůči precipitaci uhlíku na hranici zrn a vyniká svojí svařitelností. Obecně má tato ocel výjimečnou odolnost vůči vzniku koroze a dobrou pevnost. V tab.1 je možné vidět nominální hodnoty pro vzorky vyrobené kovovým 3D tiskem poskytnuté výrobcem a obecné fyzikální vlastnosti materiálu.

Tab. 1 Materiálový list od firmy XactMetal

Tepelná vodivost	16,2 W/mK
Teplota tání	1371-1399 °C
Koeficient tepelné roztažnosti	$16 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Mez pevnosti v tahu	572 MPa (± 7 MPa)
Smluvní mez pevnosti	455 MPa (± 7 MPa)
Prodloužení	44 % (± 2 %)
Youngův modul	173 GPa (± 18 GPa)
Tvrдость	90 HRB

Tato tabulka byla převzata z materiálového listu umístěného v příloze.

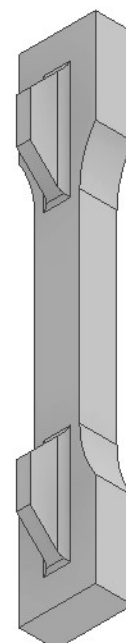
3.1 Návrh vzorku [40]

Vzhledem k tomu, že vzorky budou zhotoveny tisknutím materiálu, je nutné vzít v potaz i specifické požadavky a náležitosti, které musí být dodrženy k dosažení korektních výsledků. Jedna z náležitostí, kterou je nutno dodržet, je dána výrobcem, který doporučuje, že pro dosažení spolehlivých výsledků je nutné součást obrobit. Z tohoto důvodu byly během návrhu přidány přídatky na obrábění na všech plochách. V našem případě budou vzorky obráběny na pětiosé CNC frézce. Proto byl návrh obohacen o výstupky na povrchu, které pomohou při upínání a minimalizují počet vyjmutí a znovu upnutí vzorku, viz obr.20.

Vzorek samotný byl navržen podle normy ČSN EN ISO 6892-1, která udává i potřebné požadavky na rozměry testovaného tělesa. Základní rovnici popisující měřicí délku vzorku pro tahovou zkoušku lze zapsat následovně:

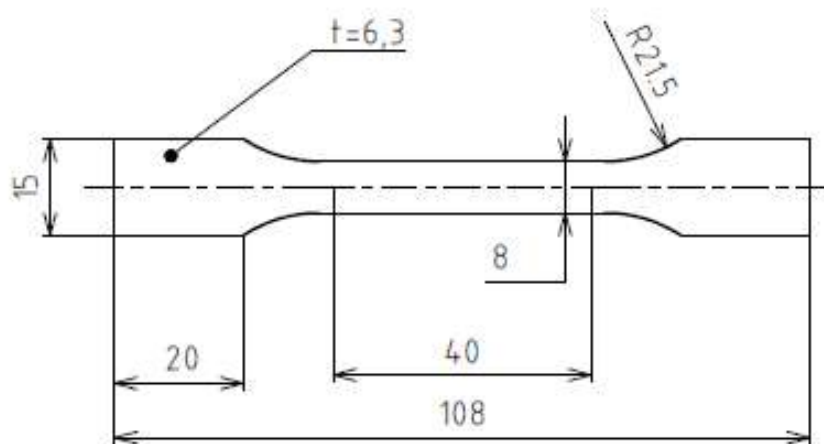
$$L_o = 5.65 \cdot \sqrt{S} = 5.65 \cdot \sqrt{a_1 \cdot b_1} \quad (3.1)$$

kde: L_o – měřená délka [mm],
 S – průřez vzorku [mm²],
 a_1 – Šířka vzorku [mm],
 b_1 – Tloušťka vzorku [mm].



Obr. 20 Návrh tisknutého vzorku

Vzhledem k použitým metodám pro měření byly dimenze zvoleny tak, aby měřená vzdálenost dosahovala hodnoty okolo 40 mm. Průřez má tudíž rozměry 8×6,3 mm. Zbylé rozměry jsou dále odvozené od těchto hodnot. Na obr. 21 je znázorněn náčrt finálního vzorku.



Obr. 21 Rozměry vzorku

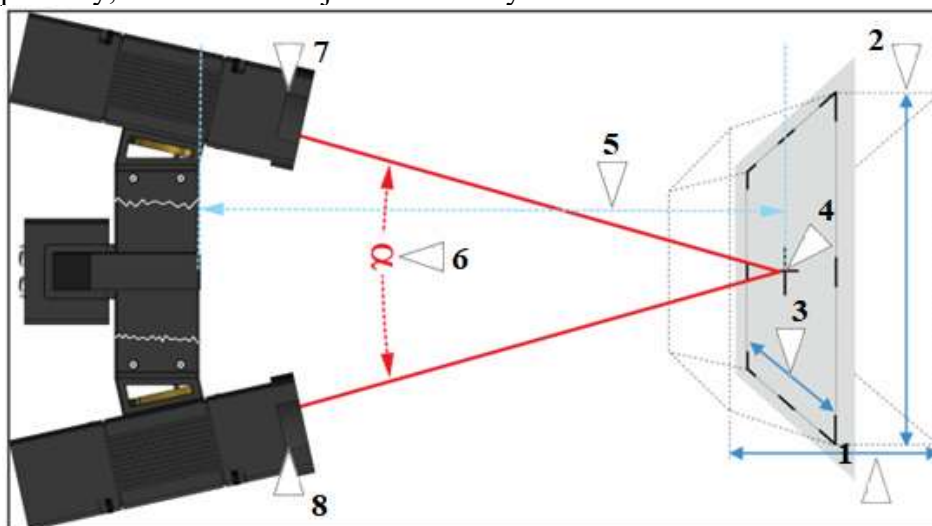
Podrobnější náčrt návrhu vzorku byl umístěn do přílohy.

3.2 Použité zařízení a vzorky

Experiment proběhl za pomoci soustavy zařízení, jejíž vlastnosti byly nastíněny v předchozích kapitolách. Optické měření proběhlo na zařízení Aramis SRX s přidaným osvětlením. Tisk vzorků proběhl na tiskárně XM200C od firmy XactMetal a test samotný proběhl na trhačím stroji Zwick/Roell.

3.2.1 Aramis SRX 12M [41]

Zařízení Aramis bylo použito pro snímání deformačních snímků (čelisti trhačím stroje s upnutým vzorkem). Zařízení bylo kalibrováno na měřící objem MV130, což znamená, že kalibrujeme prostor o největším zaokrouhleném rozměru 130 mm. Obr.22 znázorňuje pomyslný prostor, kde bude měřená oblast umístěna. Kalibrováný objem má přesné rozměry 130×100×40 mm a úhel mezi kamerami je pevně daný ramenem, na kterém jsou kamery připevněny, a hodnota úhlu je stanovena výrobcem na 25°.



- 1) Výška měřicího objemu, 2) Délka měřicího objemu (130 mm), 3) Šířka měřicího objemu, 4) Střed měřicího objemu, 5) Měřící vzdálenost (vzdálenost k rovině ostroty), 6) Úhel kamer, 7) Objektiv levé kamery, 8) Objektiv pravé kamery

Obr. 22 Měřicí objem zařízení Aramis [41]

Referenční značky předepsané pro tento objem mají průměr 0,4 mm vnitřního bílého kruhu, viz obr.12. V tab.2 Jsou uvedeny technické specifikace pro tuto konfiguraci zařízení.

Tab. 2 Technické specifikace Aramis SRX [41]

Systém/rozměr ramena	Rozměry zařízení	Optimální teplota okolí	Rozsah pořizovacích frekvencí	Rozlišení kamer	Váha
Aramis SRX/180mm	340x320x260 mm	5 až 35 °C	až 1000Hz	4096 × 3068 pixelů	6,9 kg

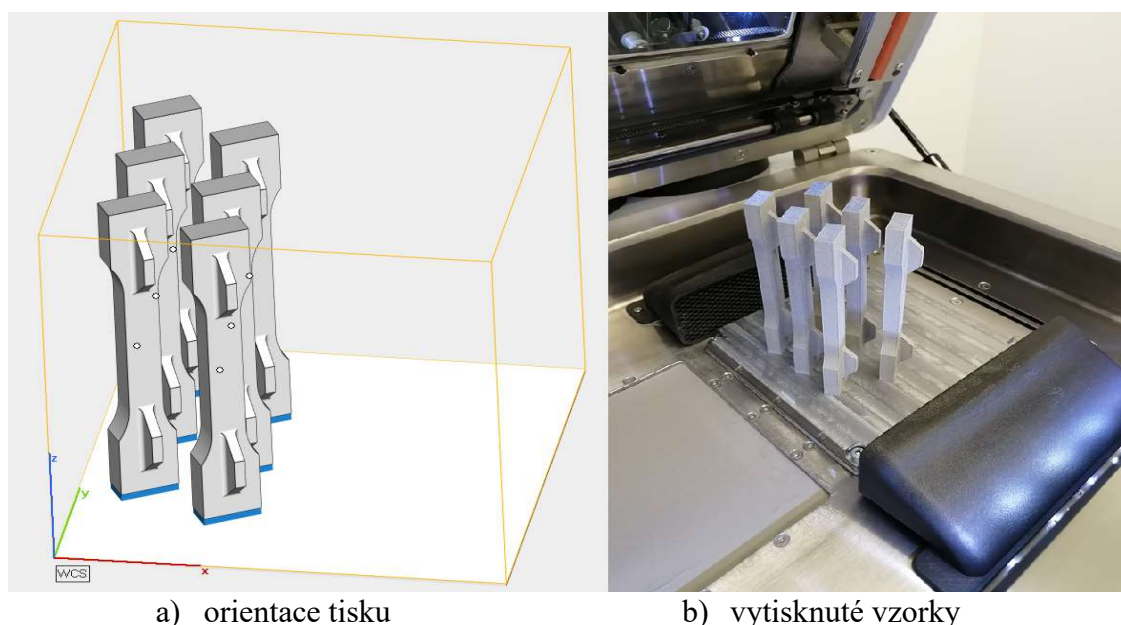
3.2.2 Tiskárna XactMetal XM200C [6], [20]

K tisknutí vzorku, jak bylo již v předešlých kapitolách zmíněno, byla použita tiskárna XactMetal typu XM200C viz Obr.7. Tiskárna je vybavena optickou soustavou (skenerem), která dokáže paprsek laseru směřovat vždy kolmo na plochu, což pomáhá spékat vrstvy konzistentně po celé ploše stavby. Tiskárna dokáže spékat materiál rychlostí až 650 mm/s. V tab.3 jsou uvedeny technické specifikace tiskárny.

Tab. 3 Technické specifikace tiskárny [6], [20]

Stavební prostor	2048 cm ³ (127x127x127 mm)
Rozměry tiskárny	610 x 610 x 1295 mm ³
Typ Laseru	Yb laserový paprsek o výkonu 100W.
Přesná optika	Stopa paprsku větší než 20 mikronů.
Skener	Rychlost spékání až 650 mm/s Ortogonalní vysokorychlostní skener
Požadavky na napájení	Napájecí zdroj 200-240 VAC jednofázový 50 Hz 1.5kW, 2.0kW ve špičce
Hmotnost	205 kg

Celý proces tisku šesti vzorků trval 42 hodin. Proces je časově náročný, protože naše vzorky mají nejvyšší možnou hustotu výplně - 97,5 %. Na následujícím obr.23a je vidět zvolená orientace tisku, která ovlivňuje výsledné materiálové vlastnosti a udává srovnatelné hodnoty poskytnuté výrobcem, viz tab.1. Na obr.23b jsou vidět vytisknuté vzorky, připravené na následné obrábění.



Obr. 23 Tisk vzorků

3.2.3 Zwick Roell BT-1 [42]

Jako zkušební stroj bylo použito trhací zařízení od firmy Zwick/Roell, dosahující nominální tažné síly 100kN. Na trhacím stroji jsou nainstalované samosvorné zkosené čelisti, do kterých byly vzorky upnuty. Stroj je také vybaven interním softwarem, který jej ovládá. V tomto případě je software nainstalován a stroj připojen přímo do výpočetní stanice, která také ovládá zařízení Aramis. Ze stroje do výpočetní stanice je veden analogový výstup, který do optického měření zavede sílu jako proměnnou, kterou působíme na vzorek. Obdobná verze tohoto trhacího stroje je vidět na obr.24b.

3.3 Průběh zkoušky

Vzorky byly před experimentem očištěny a byl na ně nanesen stochastický nástřík v kombinaci s referenčními body viz obr.25b. Pro zajištění konzistence výsledku bylo na tiskárně vytisknuto celkem šest vzorků, které byly stejným způsobem očištěny a připraveny na optické měření.

V softwaru Zwick/Roell byl nastaven analogový výstup, což znamená že za hodnotu dosažené síly pošle trhací stroj signál do stanice ve formě změny napětí. V případě zařízení Aramis, které dokáže rozeznat změny v rozmezí ± 10 V, bylo nutné nastavit v trhacím stroji konverzní faktor. Konverzní faktor je hodnota, při které bude trhací stroj posílat do analogového výstupu hodnotu 1 Volt. Během experimentu byl použit faktor 5000/1, což znamená, že při 5000 N byla na analogovém výstupu zaznamenána změna 1 V. Během testu nebylo použito osvětlení integrované do zařízení Aramis z důvodu velice malého pozorovacího objemu a velkého rozměru upínacích čelistí, které světlu bránily. Tento problém byl vyřešen pomocí dvou LED reflektorů, které svítily z obou stran na měřené vzorky a tak zajistily přijatelný kontrast stochastického nástříku a minimalizovaly odlesky, které by mohly způsobit problémy při vyhodnocení viz obr.25a.



Obr. 24 Trhací stroj Zwick Roell [42]



a) Sestava zařízení a scéna

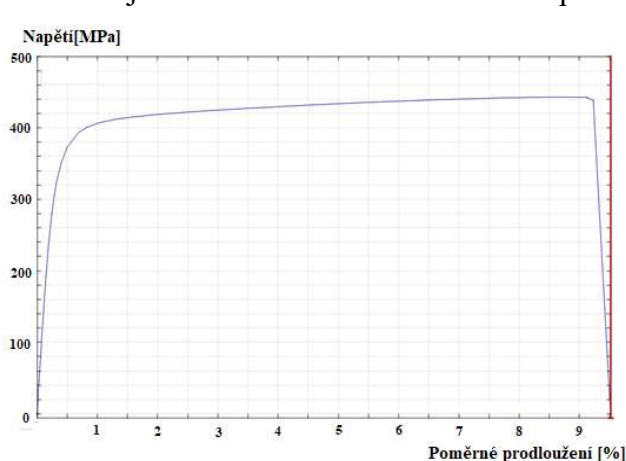
b) Snímek ze zařízení Aramis

Obr. 25 Prostředí měření

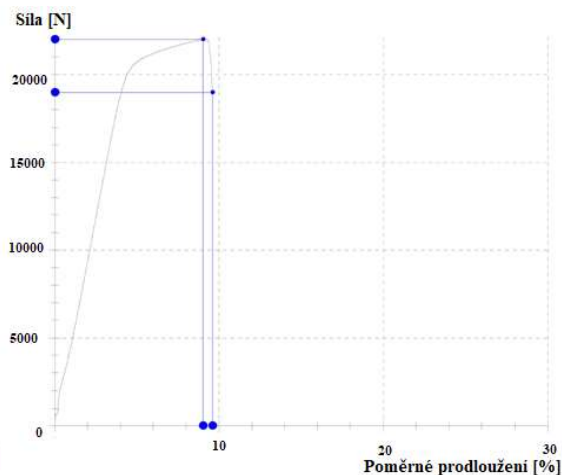
Během zkoušky byl kladen důraz na stabilní podmínky. Proto test nezačal dřív, než se všechna zařízení včetně osvětlení nezahřála. Vzorky byly stejnou dobu vystavené teplotě okolo zařízení, která se během experimentu pohybovala mezi 24,5 – 25,5°C.

Během experimentu byly softwarem Zwick/Roell a systémem Aramis generovány tahové diagramy, které již v průběhu měření poskytují rámcovou představu o chování materiálu. Na obr.26a je vidět diagram generovaný optickým měřením, oproti tomu na obr. 25b je zobrazen diagram přímo z trhacího stroje. Již v tuto chvíli je možné vidět podobnost mezi diagramy až po přímkou, která se objeví po roztrhnutí vzorku. Tento jev je ovlivněn skutečností, že i po roztrhnutí vzorku optické měření nadále pokračuje, přestože trhací stroj přestal zaznamenávat ve chvíli, kdy došlo k 80% poklesu síly. Do přílohy byl umístěn diagram série měření získaný z trhacího stroje.

Diagramy ukazují, že materiál nevykazuje výrazné plastické chování a je velmi křehký. Zároveň je také vidět solidní mez pevnosti v rozmezí od 400 do 440 MPa.



a) diagram ze zařízení Aramis



b) diagram ze zařízení Zwick Roell

Obr. 26 Tahové diagramy

Po první zkoušce bylo také možné podrobit vzorky detailnějšímu pohledu, na kterém se křehkost materiálu potvrdila v podobě křehkého lomu, viz obr.27b. Na straně vzorků, na kterou nebyla nanесena vrstva stochastického nástřiku, je možná vidět nepatrná delaminace vrstev, viz obr.27a.



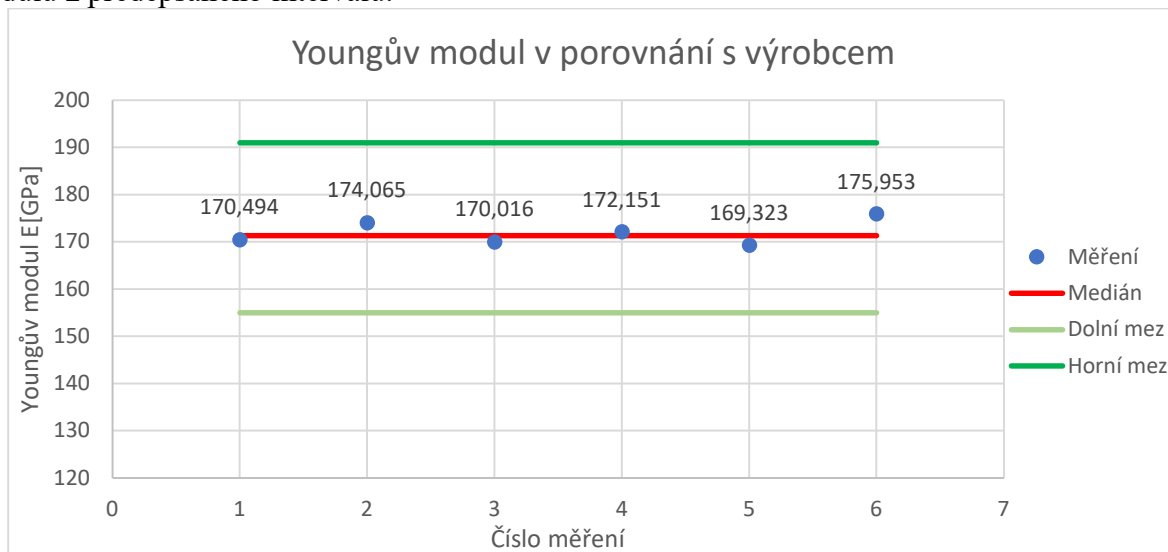
Obr. 27 Chování vzorků

3.4 Vyhodnocení

Jako referenci pro kontrolu experimentu byl zvolen materiálový list od firmy XactMetal. Veličiny, které budou následně analyzovány, byly vybrány jako nejdůležitější parametry ocelí. Jedná se o mez pevnosti v tahu a modul pružnosti. Hodnoty v této kapitole jsou brány výhradně ze zařízení Aramis. Měření, které provedlo trhací zařízení, je v tomto případě pouze nominální a slouží pouze k porovnání výsledků s optickým měřením, popřípadě k potvrzení správnosti.

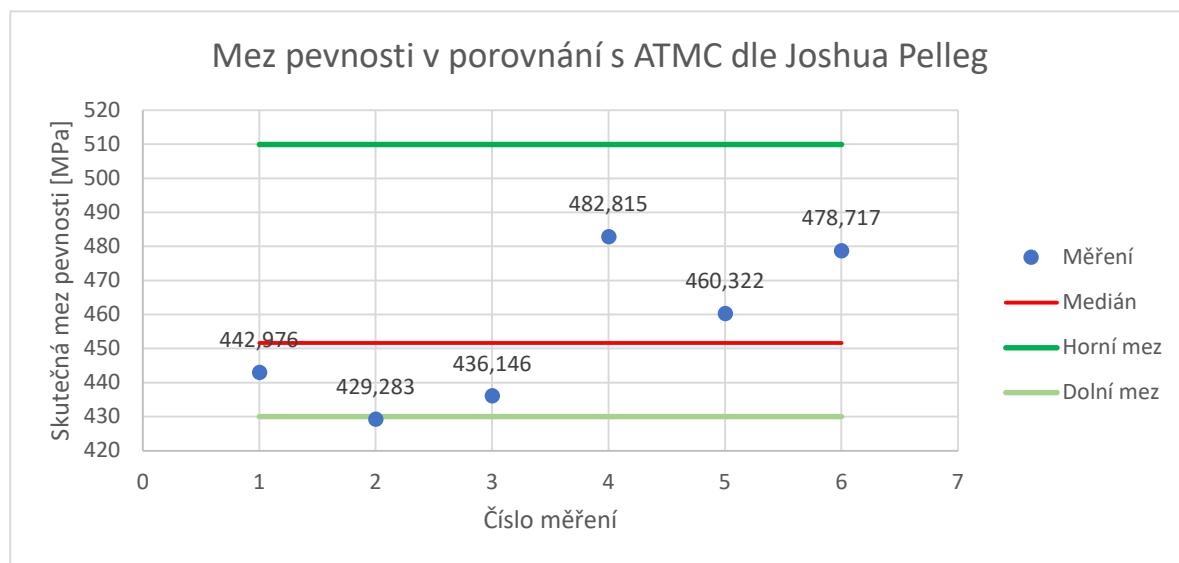
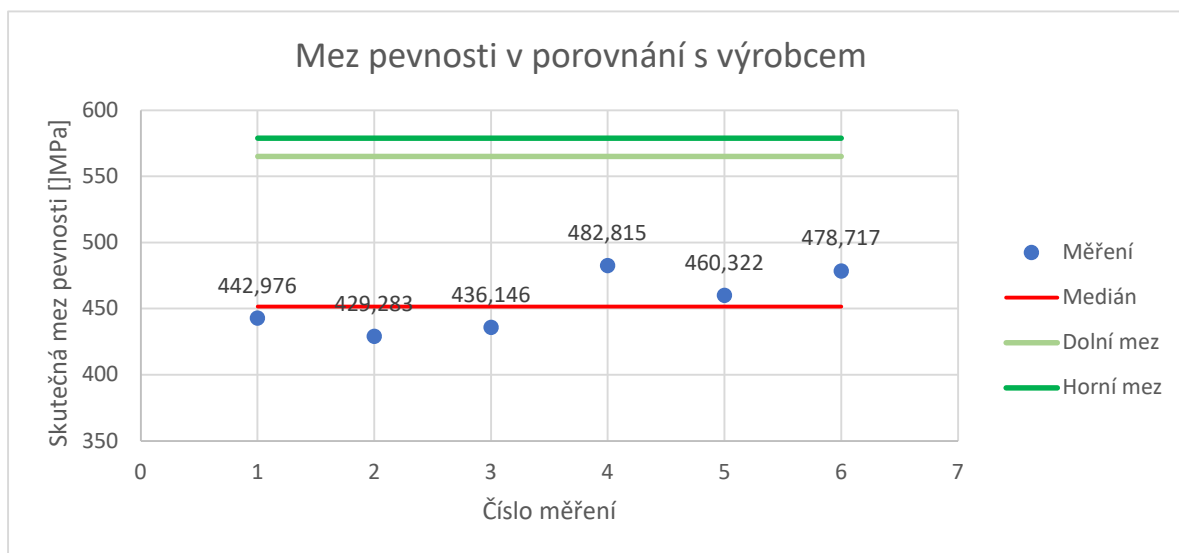
3.4.1 Modul pružnosti (Youngův modul) [5]

Tato veličina napříč měřeními splnila jak parametry garantované dodavatelem, tak očekávané hodnoty v porovnání s obvyklými hodnotami, kterých dosahují vzorky vytvořené pomocí aditivní výroby. Na grafu je vidět, že medián měření se nachází v intervalu předepsaném dodavatelem. Také je možné vidět, že ani u jednoho vzorku nevystoupila hodnota Youngova modulu z předepsaného intervalu.



3.4.2 Mez pevnosti v tahu [5]

U této veličiny již došlo k výrazným odchylkám vůči nominálním hodnotám danými výrobcem. Vzhledem k této skutečnosti jsou hodnoty porovnávány nejen s materiálovým listem od firmy XactMetal, ale i s hodnotami obsaženými v citované literatuře [5]. Mez pevnosti porovnaná s výrobcem se liší v průměru asi o 100 MPa. Dle reference obsažené v knize od israelského vědce a učitele Joshuy Pellega jsou hodnoty vyhovující a odpovídají tradičním hodnotám, které jsou dosažené kovovým 3D tiskem.



3.4.3 Kontrola meze pevnosti v tahu

Pro kontrolu hodnot změřených pomocí digitální korelace bylo nutné porovnat je s hodnotami, které zaznamenal trhací stroj (protokol o měření v příloze). Tohoto bylo dosaženo pomocí následujícího základního vzorce a vypočtené hodnoty byly zapsány do následující tab.4.

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (3.2)$$

kde: F – maximální dosažená síla [N],
 S – obsah průřez vzorku [mm²],
 σ – vypočítané napětí [MPa].

Tab. 4 Porovnání hodnot z trhačího stroje a Aramisu

Číslo vzorku [-]	Maximální dosažená síla F [N]	Vypočítané napětí σ [MPa]	Napětí ze systému Aramis σ' [MPa]
1	22300	442,460	442,976
2	21600	428,571	429,283
3	22000	436,507	436,146
4	24300	482,143	482,815
5	23200	460,317	460,322
6	24100	478,174	478,717

Hodnoty vypočtené softwarem Aramis se shodují s hodnotami, které byly zaznamenány na trhačím stroji Zwick/Roell. Odchyly od hodnot ze softwaru Aramis jsou způsobené skutečností, že trhačí stroj Zwick/Roell generuje hodnoty pouze ve stovkách Newtonů.

4 Závěry

První část práce byla věnována popisu základních druhů 3D tisku rozdělených podle materiálů, který tiskárna zpracovává. Snahou bylo obeznámit čtenáře s aditivní výrobou a s metodami 3D tisku, zdůraznit jejich výhody a nevýhody a popsat aktuální vývoj těchto metod v posledních letech. Konkrétní metody, které jsou popsány, byly zvoleny nejen jako nejvýznamnější představitelé své kategorie, ale také s ohledem na hlavní téma této bakalářské práce. Proto k metodám věnujícím se tisknutí kovu byly zvoleny dva hlavní představitelé, kteří se používají v praxi nejčastěji a poskytují nejlepší výsledky. Jedná se o metodu přímého laserového spékání (DMLS) a metoda selektivního laserového tavení (SLM).

Podstatná část literární rešerše byla však věnována optickým metodám měření a principům, na základě kterých pracují zařízení od firmy GOM. Tato firma byla zvolena s ohledem na fakt, že disponuje nejnovějšími a progresivními zařízeními, které pracují na principu digitální korelace obrazů. Tato technologie funguje na základě porovnání rychle za sebou jdoucích snímků a vyhodnocení pohybů bloků pixelů nebo referenčních bodů.

Jedním z cílů této práce bylo propojení těchto světů, které sdílí přízvisko progresivních 3D technologií. Nejlepší způsob, jak toho docílit, bylo provedení měření pomocí zařízení Aramis, kde měřený vzorek byl vytisknutý na 3D tiskárně od firmy XactMetal. Tato tiskárna pracuje na principu DMLS a dokáže tisknout malé až střední součásti, které dokážou konkurovat svými pevnostními charakteristikami tradičně vyráběným součástem.

Pro měření byla zvolena zkouška tahem, pro kterou bylo nutné vzorky obrobít a upravit povrch pomocí stochastického nástřiku. Již během měření bylo poznat, že materiál nevykazuje výrazné plastické chování a je tedy poměrně křehký. Pro správné pochopení chování materiálu byly zvoleny dvě základní veličiny, které popisují chování standardně vyráběných materiálů, v tomto případě mez pevnosti v tahu a Youngův modul neboli mez pružnosti.

Pružné vlastnosti vzorků byly více či méně zaručeny, naměřené výsledky se vždy pohybovaly v rozmezí udaném výrobcem a zároveň souhlasí i s obvyklými hodnotami dosaženými při aditivní výrobě. V případě meze pevnosti v tahu již byly odchylky výrazné a hodnoty nezapadaly do předem známých mezí. Data, která byla získána ze systému Aramis, byla porovnána s hodnotami z trhacího stroje a shodovala se solidní přesností ve všech šesti měřeních. Odchylka, která vznikla, byla bezpochyby způsobena hustotou výplně tisků, vzorky v této práci byly totiž vytisknuty s výplní 97,5 %. Materiálový list od firmy XactMetal byl vytvořen na základě měření vzorků s výplní 99,5 %, čehož výrobce dosahuje pomocí kombinace obvyklého tisknutí a následného izostatického lisování (Hot isostatic pressing). Uvedené odůvodnění je podloženo skutečností, že v knize od izraelského vědce a učitele Joshuy Pellega, který provedl měření v rozmezí výplní 96,5-97,5 %, dosahují vzorky velice podobných hodnot jako v tomto případě.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. GEBHARDT, Andreas. *Rapid prototyping*. 1st ed. Munich : Cincinnati: Hanser Publishers ; Hanser Gardener Publications, 2003. ISBN 978-1-56990-281-3.
2. CHUA, Chee Kai a Kah Fai LEONG. *3D printing and additive manufacturing: principles and applications*. Fourth edition of Rapid prototyping. Hackensack, New Jersey: World Scientific, 2015. ISBN 978-981-4571-40-1.
3. *What is Rapid Prototyping? - Definition, Methods and Advantages* [online]. [vid. 2021-02-27]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-manufacturing-what-is-rapid-prototyping.aspx>
4. *What is additive manufacturing? Applications, technologies and benefits* [online]. [vid. 2021-02-22]. Dostupné z: <https://bitfab.io/blog/additive-manufacturing/>
5. PELLEG, Joshua. *Additive and traditionally manufactured components*. Cambridge: Elsevier, 2020. ISBN 978-0-12-821918-8.
6. *XACTMETAL Dostupný 3D tisk z kovu technologií powder bed fusion*. [online]. [vid. 2021-02-26]. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/produkty/xm200c/>
7. *ARAMIS 3D camera systems: High-end industrial applications* [online]. [vid. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.gom.com/en/products/3d-testing/aramis-3d-camera>
8. PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. : il. ; 30 cm. ISBN 978-80-214-4025-8.
9. *The Ultimate Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing* [online]. [vid. 2021-02-28]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>
10. *Industrial SLA vs. Desktop SLA - Protofab 3D Printing Company* [online]. [vid. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.3dprotofab.com/industrial-sla-vs.-desktop-sla.html>
11. *Introduction to SLA 3D printing | 3D Hubs* [online]. [vid. 2021-03-22]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing/>
12. *Stereolithography - Additively* [online]. [vid. 2021-02-28]. Dostupné z: <https://www.additively.com/en/learn-about/stereolithography>
13. *filamenty FDM tisk* [online]. 1. říjen 2016 [vid. 2021-02-28]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pla/>
14. *Fused Deposition Modeling - Additively* [online]. [vid. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://www.additively.com/en/learn-about/fused-deposition-modeling>
15. *F900 3D Printers for Large Build Manufacturing* [online]. [vid. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/3d-printers/stratasys-f900>
16. *Original Prusa i3 MK3S+. Prusa3D - 3D Printers from Josef Průša* [online]. [vid. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/original-prusa-i3-mk3/>
17. SLM SOLUTIONS. *SLM® Medical and Dental Applications: Metal Additive Manufacturing Solutions for Healthcare*. [online]. [vid. 2021-03-26]. Lübeck. Dostupné z: www.slm-solutions.cz
18. *DMLS vs SLM 3D Printing for Metal Manufacturing*. [online]. [vid. 2021-03-01]. Dostupné z: <https://www.element.com/nucleus/2016/06/29/dmls-vs-slm-3d-printing-for-metal-manufacturing>
19. *How Direct Metal Laser Sintering (DMLS) Really Works* [online]. [vid. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://i.materialise.com/blog/en/direct-metal-laser-sintering-dmls/>
20. *XM200C Xact Metal Accessible Metal Powder-Bed Fusion 3D Printing* [online]. [vid. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://xactmetal.com/xm200c/>

21. GIBSON, Ian, David W ROSEN a Brent STUCKER. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. Boston, MA: Springer US, 2010. ISBN 9781441911193. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4419-1120-9
22. ČIŽMÁROVÁ, Elena, Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
23. *ATOS Q* [online]. [vid. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/produkty/atos-q/>
24. *ARGUS: Optical forming analysis - high-precision, flexibility* [online]. [vid. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.gom.com/en/products/3d-testing/argus>
25. GOM GMBH. *Aramis: Technologie pro 3D optické měření pohybu a deformací*. MCAE Systems s.r.o. Kuřim, 2020, 16 s. Rev. A (en) 08/0817. Dostupné z: https://www.mcae.cz/wp-content/uploads/2020/10/GOM_brochure_ARAMIS_CZ_nahled_.pdf.
26. MCCORMICK, Nick a Jerry LORD. Digital Image Correlation. *Materials today* (Kidlington, England). 2010, **13**(12), 52–54. ISSN 1369-7021.
27. GOM GMBH. *3D Testing: Digital Image Correlation and Strain Computation Basics* [online]. 2016, Braunschweig, 26 s. [cit. 2021-4-7]. Dostupné z: <https://library.gom.com/>.
28. GOM GMBH. *GOM Software 2020: Inspection Basic Training - 3D Testing*. [online]. 2016, Braunschweig, 165 s. [cit. 2021-4-8]. Dostupné z: <https://library.gom.com/>.
29. WIJENAYAKE, Udaya, Sung-in CHOI a Soon-yong PARK. Automatic Detection and Decoding of Photogrammetric Coded Targets [online]. 2016 [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: doi:10.1109/ELINFOCOM.2014.6914413.
30. JELÍNEK, Dan. *3D optické měřicí systémy vhodné pro technologie tváření* [online]. Brno, 2017 [cit. 2021-4-20]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/66048>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Eva Peterková.
31. BELL, Colin, Ellen JUMP, William KERR, Jonathan CORNEY, Nicola ZUELLI a David SAVINGS. *Correlation between von Mises strain and material thinning in a hydroformed sample of Ti35A aerospace grade titanium*. In: AIP Conference Proceedings [online]. AIP Publishing, 2017 [cit. 2021-04-11]. ISBN 978-0-7354-1580-5. ISSN 0094-243X. Dostupné z: doi:10.1063/1.5007986.
32. *Explore GOM* [online]. [vid. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.gom.com/en/explore-gom>
33. *ARAMIS Adjustable: The modular measuring system for 2D and 3D analysis* [online]. [vid. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.gom.com/en/products/3d-testing/aramis-adjustable>
34. *TRITOP* [online]. [vid. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/produkty/tritop/>
35. *TRITOP: Optical photogrammetry systém flexibility, mobility* [online]. [vid. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.gom.com/en/products/3d-scanning/tritop>
36. *Metrology Equipment : Doosan Škoda Power* [online]. [vid. 2021-03-28]. Dostupné z: <http://www.doosanskodapower.com/en/turbomachinery-services/3d-scanning-and-reverse-engineering/metrology-equipment/>
37. *Photogrammetry in the industry: from an image to a 3D measuring report* [online]. [vid. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.gom.com/en/topics/photogrammetry>
38. *ATOS 5: Industrial metrology, high-speed, high-precision* [online]. [vid. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.gom.com/en/products/high-precision-3d-metrology/atos-5>
39. *Digitalizovali jsme další skvost-Škoda Sport*. [online]. [vid. 2021-04-13]. Dostupné z: https://www.mcae.cz/pripadove_studie/digitalizovali-jsme-dalsi-skvost-skoda-sport/

40. ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály - Zkoušení tahem: Zkoušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
41. GOM GMBH. *Aramis SRX: User Manual Hardware*. [online]. 2017, Braunschweig, 61 s. [cit. 2021-4-7]. Dostupné z: <https://library.gom.com/>.
42. *ZwickRoell Z020, pre-owned* - ZwickRoell [online]. [vid. 2021-05-11]. Dostupné z: <https://www.zwickroell.com/products/pre-owned-market/pre-owned-z020-allroundline-20-kn/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
3D	Trojdimenzionální (Trojrozměrný)	[-]
A	Tažnost	[%]
a_1	Šírka vzorku	[mm]
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren	[-]
b_1	Tloušťka vzorku	[mm]
CAD	Computer Aided Design (počítačem podporované projektování)	[-]
CCD	Charge-coupled device	[-]
d	průměr kruhu mřížky	[mm]
DIC	Digital Image Correlation (digitální korelace obrazů)	[-]
DMLS	Direct metal laser sintering	[-]
F	Síla	[N]
l_2	rozměr vedlejší poloosy	[mm]
l_1	rozměr hlavní poloosy	[mm]
FDM	Fused deposition modeling	[-]
FLC	Flow limit curve	[-]
FLD	Forming limit diagram	[-]
L_o	Měřená délka	[mm]
PLA	Polylactic acid (kyselina polymléčná)	[-]
R_e	Mez kluzu	[MPa]
R_m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
RP	Rapid Prototyping	[MPa]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	[MPa]
S	Obsah průřezu vzorku	[-]
SLA	Stereolitografie	[-]
SLM	Selective Laser Melting	[-]
STL	Standart Triangle language	[-]
Z	Kontrakce	[%]
σ'	Napětí ze systému Aramis	[MPa]
σ	Vypočítané napětí	[MPa]
$\varepsilon_{tlak/tah}$	poměrná deformace	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 3D Technologie	7
Obr. 2 Subtraktivní/Aditivní metody [4].....	12
Obr. 3 Rozdělení metod 3D tisku [2]	13
Obr. 4 Tiskárny využívající technologii SLA	14
Obr. 5 Ilustrace tisku metodou SLA [12]	14
Obr. 6: Znárodnění metody FDM [14]	16
Obr. 7 Tiskárny využívající technologii FDM	16
Obr. 8 SLM/DMLS tiskárna XM200C [20]	18
Obr. 9 Princip metody DMLS [19].....	18
Obr. 10 Zařzení a využití tiskáren SLM.....	19
Obr. 11 Stochastický nástřik a facety [27]	21
Obr. 12 Referenční body: d) kódovaný kruhový bod [29], c) kódovaný čtvercový bod [29]	23
Obr. 13 Měření systémem Argus.....	23
Obr. 14 Varianty zařízení Aramis.....	25
Obr. 15 Měření pomocí zařízení Aramis 3D Camera [7]	26
Obr. 16 Systém Tritop	27
Obr. 17 Výstup z měření pomocí zařízení ARGUS [24].....	27
Obr. 18 Optické skenery	28
Obr. 19 Použití systému Atos	28
Obr. 20 Návrh tisknutého vzorku	29
Obr. 21 Rozměry vzorku	30
Obr. 22 Měřicí objem zařízení Aramis [41]	30
Obr. 23 Tisk vzorků.....	31
Obr. 24 Trhací stroj Zwick Roell [42]	32
Obr. 25 Prostředí měření	33
Obr. 26 Tahové diagramy	33
Obr. 27 Chování vzorků	34

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Materiálový list od firmy XactMetal.....	29
Tab. 2 Technické specifikace Aramis SRX [41]	31
Tab. 3 Technické specifikace tiskárny [6].....	31
Tab. 4 Porovnání hodnot z trhacího stroje a Aramisu	36

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Materiálový list XactMetal
Příloha 2: Náčrt navrhnutého vzorku
Příloha 3: Porovnání metod 3D tisku
Příloha 4: Data z trhacího stroje



316L Stainless Steel





Description

Name

316L Stainless Steel

Standards

ASTM UNS S31603

EURONORM 1.4404

Overview

316L alloy is a molybdenum bearing austenitic stainless steel and is an extra-low carbon variation. Due to its low carbon content, 316L is resistant to sensitization (carbide precipitation at grain boundaries) and displays good welding characteristics. It is more resistant to general corrosion compared to conventional nickel chromium stainless steels such as 304. It has high creep resistance and good tensile strength at elevated temperatures.

Uses

316L stainless steel is commonly used in many industries and applications, including the following:

- General prototyping and tooling
- Chemical and pharmaceutical applications
- Surgical and medical tooling
- Petroleum equipment
- Duct works
- Heat exchanger tubes.



Technical Data

Material Composition

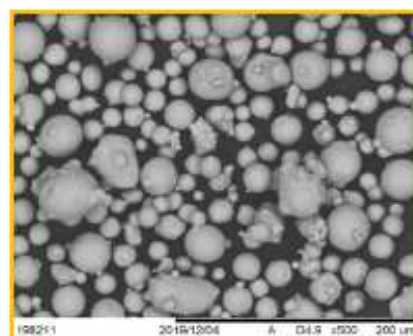
Per ASTM B215

Element	Weight %
Fe	Balance
Cr	16.00 – 18.00
Ni	10.00 – 14.00
Mo	2.00 – 3.00
Mn	<= 2.00
Si	<= 1.00
Cu	<= 0.75
N	<= 0.10
O	<= 0.10
Co	<= 0.10
P	<= 0.045
C	<= 0.03
S	<= 0.03

Powder Particle Size

Per ASTM B822

d10	15-25 μm
d50	25-35 μm
d90	40-60 μm



Powder Apparent Density

Per ASTM B212

4 g/cc



Process Data

Layer Thickness	30 μm
Laser Power	100 W
L-PBF System	XM200C

Chemical Properties of Parts

Thermal Conductivity	16.2 W/mK
Melting Range	1371 – 1399 C
Coefficient of Thermal Expansion (@ 0-100 C)	$16 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Microstructure of Parts

Image of As-Printed Part Cross-Section

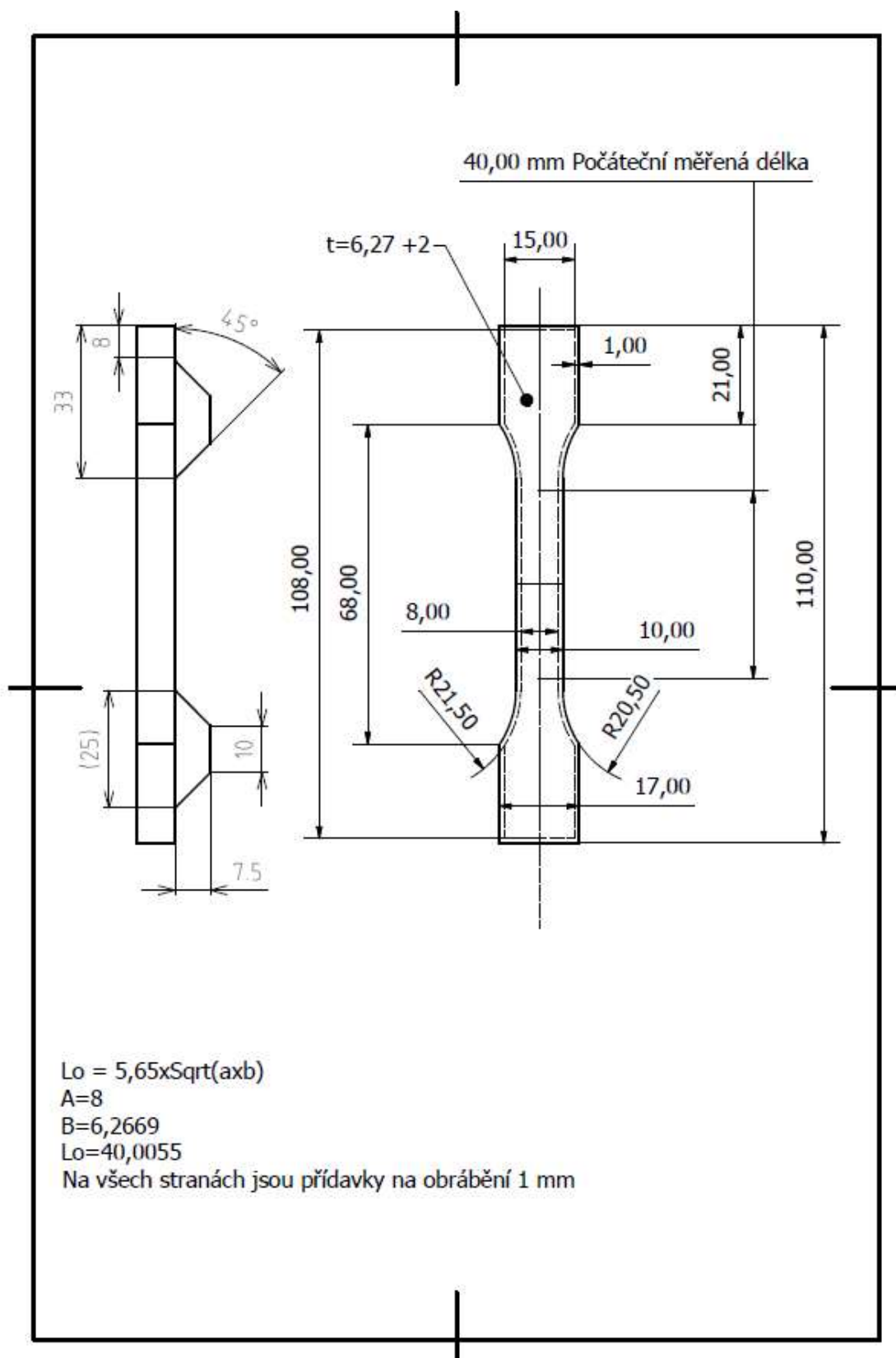




Physical Properties of Parts

Mechanical Properties at Room Temperature

Property	Average	Std. Deviation
Component Density	7.92 g/cc	0.04 g/cc
Ultimate Tensile Strength (UTS) - ASTM E8		
Horizontal (XY)	88 ksi (607 MPa)	1 ksi (7 MPa)
Vertical (Z)	83 ksi (572 MPa)	1 ksi (7 MPa)
Yield Strength - ASTM E8		
Horizontal (XY)	70 ksi (432 MPa)	2 ksi (14 MPa)
Vertical (Z)	66 ksi (455 MPa)	1 ksi (7 MPa)
Elongation at Break - ASTM E8		
Horizontal (XY)	37 %	2 %
Vertical (Z)	44 %	2 %
Modulus of Elasticity - ASTM E8		
Horizontal (XY)	26,463 ksi (182 GPa)	3,770 ksi (26 GPa)
Vertical (Z)	25,031 ksi (173 GPa)	2,587 ksi (18 GPa)
Hardness (Rockwell) - ASTM E18	90 HRB	2 HRB



Metoda	Krátký popis	Výhody a nevýhody	Použití
Direct laser melting sintering (DMLS)	Selektivní spékání vrstev kovového práškového materiálu.	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Výborné mechanické vlastnosti ➤ Tisknutí komplexních geometrií 	Funkční prototypy nebo konečné součásti určené na malé zatížení.
		<ul style="list-style-type: none"> ➤ Prostorově a energeticky náročné zařízení ➤ Ekonomicky náročné na provoz 	
Selective laser melting (SLM)	Spojování vrstev materiálu natavováním jednotlivých vrstev	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Malé až nulové opracování po vytisknutí ➤ Solidní přesnost 	Užití stejné jako u metody DMLS s lepšími mechanickými vlastnostmi
		<ul style="list-style-type: none"> ➤ Dlouhá doba tisknutí ➤ Ekonomicky, energeticky a prostorově náročné na provoz 	

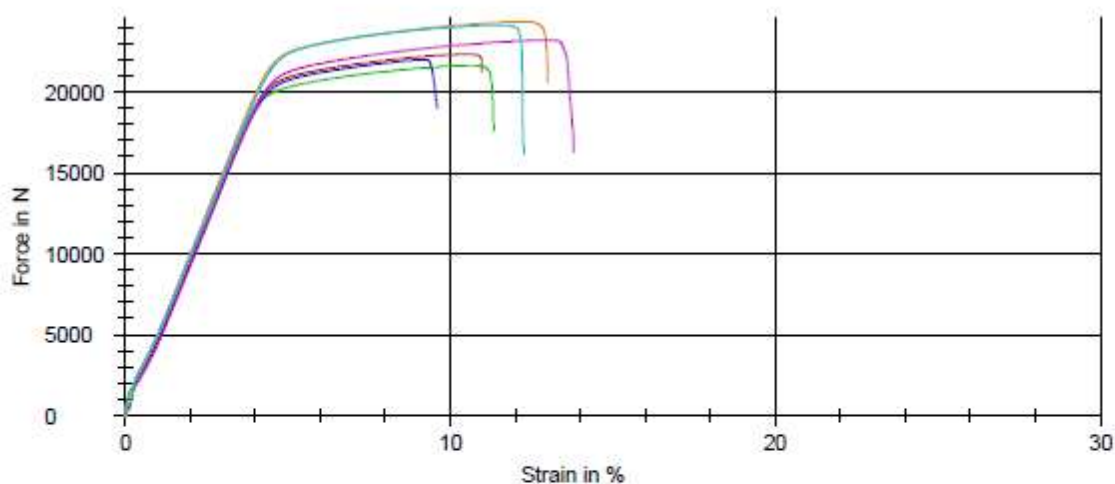
Metoda	Krátký popis	Výhody a nevýhody	Použití
Stereolitografie (SLA)	Vytvrzování fotopolymerické pryskyřice pomocí optického laseru.	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Velký rozsah materiálů ➤ Dobrá rozměrová přesnost a jakost povrchu 	Generování tvarově komplexních prototypů a modelů Modely pro odlitky malých sérií
		<ul style="list-style-type: none"> ➤ Nutné opracování a vytvrzování ➤ Složitá konstrukce podpor 	
Fused Deposition Modeling (FDM)	Vrstvení plastových materiálů dodávaných ve formě drátu do tavné trysky	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Generování kvalitních prototypů ➤ Ekonomicky výhodné 	Užití stejné jako u metody SLA s výhodou ekonomické přístupnosti této technologie.
		<ul style="list-style-type: none"> ➤ Omezená přesnost ➤ Nepředvídatelné smrštění 	

Test report

Test results:

Nr	F _{max} N	dL at F _{max} mm	F _{break} N	dL at break mm
6	22300	7.0	21200	7.3
7	21600	7.0	17600	7.4
8	22000	5.9	19000	6.2
9	24300	8.1	20600	8.7
10	23200	8.6	16300	9.2
11	24100	7.3	16200	7.9

Series graph:



Statistics:

Series n = 6	F _{max} N	dL at F _{max} mm	F _{break} N	dL at break mm
x	22900	7.3	18500	7.8
s	1130	1.0	2150	1.1
v	4.94	13.39	11.65	13.54